590 大韓機械學會論文集 第9卷 第5號, pp. 590~597, 1985.

<論 文>

직진도 개선을 위한 엔드밀링머시인의 적응제어

김종선* · 정성종** · 이종원***

(1985년 6월 12일 접수)

Adaptive Control of End Milling Machine to Improve Machining Straightness

Jong-Sun Kim, Sung-Chong Chung and Chong-Won Lee

Key Words: Straightness Error(직진도오차), Location Error(위치오차), Waviness Error(파형오차), Geometric Adaptive Control(기하학적 적응제어), Exponentially Weighted Recursive Least Sqares(지수가중 반복최소 자승)

Abstract

A recursive geometric adaptive control method to compensate for machining straightness error in the finished surface due to tool deflection and guideway error generated by end milling process is developed. The relationship between the tool deflection and the feedrate is modeled by a modified Taylor's tool life equation. Without a priori knowledge on the variations of cutting parameters, time varying parameters are then estimated by an exponentially windowed recursive least squares method with only post-process measurements of the straighthness error.

The location error is controlled by shifting the milling bed in the direction perpendicular to the finished surface and adding a certain amount of feedrate with respect to the tool deflection model before cutting. The waviness error is compensated by adjusting the feedrate during machining.

Experimental results show that location error is controlled within a range of fixturing error of the bed on the guideway and that about 60% reduction in the waviness error can be achieved within a few steps of parameter adaption under wide operating ranges of cutting conditions even if the parameters do not converge to fixed values.

1. 서 론

엔드밀링 공정은 엔드밀이 한쪽단 만으로 지지되어 공구가 회전하며 절삭작업을 수행하는 특성 때문에 수치제어를 이용한 복잡한 형상의 가공은 물론 각주형의 제품 가공에서 매우 중요한 절삭작업중의 하나이다.

정밀기계 가공의 발달로 가공정밀도가 어느 수준이상으로는 보정되어왔지만 엔드밀링 공정중의 가공정밀도는 평면절삭에서 직진도오차(straightness error)와 조도오차(roughness error)로 필연적으로 발생된다[1,2]. 이들은 밀링베드의 안내면 및 가공중의 공구의 휨에 의하여 일어나며 이를 보정하기 위하여 보통 수차례의 다

* 한국과학기술원 기계공학과
** 정회원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과
***정회원, 한국과학기술원 기계공학과

듬질절삭(finish cut)으로 이루어진 다중(multi-pass) 밀링작업을 수행하고 있으나 생산성의 저하는 물론 가공경화현상으로 가공정밀도도 저하된다.

Fig. 1과 같이 직진도오차는 원하는 가공면과 실제 가공면과의 평균적인 편차인 위치오차(location error)와 전체 직진도오차에서 위치오차를 뺀 파형오차(waviness error)로 구분된다. 조도오차는 직진도오차가 정력학적이고 결정적인(deterministic) 원인에 의하여 발생하는 것과는 달리 주로 동력학적이고 랜덤한 원인에 의하여 일어나며 파형이 높은 주파수 성분으로 이루어진다. 공작물의 크기가 커지고 채터 및 간헐적인 절삭(intermittent cutting)에 의한 조도오차를 무시할 수 있는 통상적인 절삭조건하에서는 직진도오차가 중요하게 된다.

기하학적 적응제어(geometric adaptive control, GAC)[1~3] 방법을 이용한 가공정밀도의 향상이 많이 시도되어 왔으나, 본 논문에서는 위치오차는 가공전 밀링베드를 수치제어 장치를 이용하여 가공면에 수직한 방향으로 움직여 수치제어 장치인 스텝모우터의 분해능 한계 내에서 보정하고 또한 공구휨에 상당하는 만큼 이송속도를 더함으로써 제어하며, 파형오차는 이송속도와 공구처짐 사이의 관계를 수정된 Taylor의 공구식으로 모형화하고 절삭공정중 이송속도를 적절히 조절하여 공구의 휨양을 제어함으로써 스텝모우터를 갖는 밀링머시인에서 길이 508mm, 두께 20mm의 두꺼운 철판을 평면절삭하는 경우 직진도오차를 최소로 하는 GAC 방법을 개발하였다. 측정은 밀링머시인 자체의 구조적, 동적변화나 절삭조건의 변화, 공구의 재질 및 마멸상태의 변화, 공작물의 재질 변화등에 적응할 수 있도록 Fig. 2에 보인 바와 같이 등간격으로 배열된 100개의 위치에서 가공후(post-process)측정[4,5]을 통하여 취하였고, 절삭계수의 추정은 측정점을 각각 10개씩 10개의 구간으로 묶어 각 구간에서의 계의 특성이 변하지 않는다는 가정하에서 계수를 지수가중 반복최소자승(exponentially weighted recursive least squares, EWRLS)법[6]을 이용하여 추정하고, 실제 절삭작업중 모델의 계수변화에 대한 사전 지식이 없이도 이들 계수들을 보정시킴으로써 최적의 직진도를 얻을 수 있는 절삭조건을 제시하였다. 그리고 이 방법의 도입으로 단일(single-pass)밀링작업이 가능함을 보였고 또한 방법의 타당성을 증명하기 위하여 여러 경우의 절삭상태에서 실험을 수행하였다.

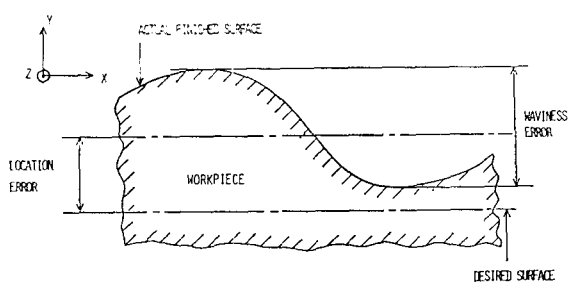

Fig. 1 Surface errors in finished surface generated by end milling process

2. 가공오차 및 공구처짐의 수학적 모형

Fig. 2와 같은 각주형의 긴 공작물의 직진도는 가공시스템의 특성에 의하여 발생되는 결정적인 오차(deterministic error)와 주위환경이나 절삭과정 중에 일어나는 랜덤한 오차(stochastic error)등에 의하여 영향을 받는다.

안내면의 부정확한 직선운동이나 공구와 밀링베드의 상대적인 강성도의 차이로 발생하는 가공오차는 일종의 결정적인 오차로 파형오차의 결정적인 원인이 되며, 공구의 처짐과 공작기계 구동장치의 부정확성에 의하여 위치오차가 발생한다.

공구의 이송방향 x에 따른 공칭 이송속도 f_0에서 직진도오차는 안내면에 의한 오차 $d(x)$와 공구처짐에 의한 오차 $d_y(x,f_0)$로부터

$$y_t(x,f_0)=\bar{d}_y+(d(x)+d_y(x,f_0)-\bar{d}_y) \quad (1)$$

와 같이 위치오차 $\bar{d}_y$와 파형오차 성분으로 나눌 수 있다. 여기서 $\bar{d}_y$는 $d_y(x,f_0)$의 x에 따른 평균치이다.

Tlusty와 Mcneil[7]은 엔드 밀링에서의 절삭력을 해석하였다. 다듬질절삭의 상향밀링의 경우 y방향의 절삭력은 양이 되며[8], 절삭력과 공구처짐 사이에 선형적인 관계가 성립한다고 가정하면 공구처짐은 일정한 반경방향 및 축방향의 절삭깊이를 갖는 경우, 스핀들 회전속도의 영향을 무시하면[8] 다음과 같이 된다.

$$d_y=cf^q \quad (2)$$

여기서 c와 q는 공구의 재질 및 마멸상태, 공작물의

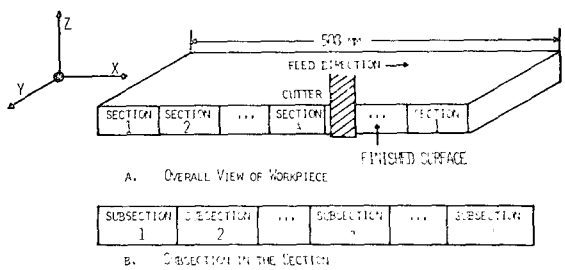

Fig. 2 Shape of workpiece

재질 그리고 밀링베드의 위치에 따른 강성도에 따라 변하는 알려지지 않은 절삭과정의 계수이다. 측정오차나 재료의 불균일성, 모형오차 및 주위환경에 의한 잡음항 v를 고려하고 식 (2)를 선형화 시키면

$$\ln d_y = \ln c + q\ln f + v \tag{3}$$

와 같이 된다. 윗 식을 Fig. 2와 같이 등간격으로 나누어진 구간에서는 계수변화가 없다고 가정하고 제어에 적합하도록 실험횟수 n에 따라서 이산화시키고 행렬식으로 표현하면

$$y_n(i,j) = X_n^T(i,j)\ \hat{\theta}_n(i) + v_n(i,j) \tag{4}$$

가 되고, 여기서

$y_n(i,j) = \ln d_{y,n}(i,j)$

$X_n^T(i,j) = (1\ \ln f_n(i,j))$

$\hat{\theta}_n(i) = (\ln\hat{c}_n(i)\ \ \hat{q}_n(i))$

$i = 1, 2, \cdots\cdots, I,\ I = 10$: 구간번호

$j = 1, 2, \cdots\cdots, J,\ J = 10$: 구간내에서의 상대적인 측정위치

T : 행렬의 전위

이고 v_n은 이산화시킨 잡음항이다.

3. 계수의 초기치 추정

일반적으로 Taylor의 공구수명식을 이용한 공구휨에서의 절삭계수를 정하기 위해서는 많은 실험을 통하여야만 그 계수를 결정할 수 있지만[9,10], 본 논문에서는 간단한 실험으로 비교적 정확한 초기의 계수를 얻는 방법을 제시한다. 즉 이송속도를 정해진 범위안에서 일정하게 선형적으로 증가시키면서 표준 절삭작업을 수행하고 이때 등간격으로 측정된 공구처짐량으로부터 최소자승법[6]을 이용하여 초기의 절삭계수를 구한다. 즉, 관측식이 공작물 상의 구간구분 없이 k번째 측정점에 따라서

$$y(k) = X(k)^T\theta_0 + v(k) \tag{5}$$

여기서 $\theta_0 = (\ln c_0\ \ q_0)$,

로 주어질 때 $v(k)$에 의한 영향을 최소로하는 θ_0 의추정치는 잔류오차의 자승합(residual sum of squares)

$$S(M) = \sum_{k=1}^{M}(y(k) - X(k)^T\theta_0)^2 = (Y_M - X_M\theta_0)^2 \tag{6}$$

여기서

$X_M^T = (X(1)\ X(2)\cdots X(M))$

$Y_M^T = (y(1)\ y(2)\cdots y(M))$

M=측정점의 갯수

을 최소로 함으로써 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_0 = (X_M^T X_M)^{-1} X_M^T Y_M \tag{7}$$

4. 기하학적 적응제어

식 (7)을 통하여 얻어진 초기 절삭계수들은 부정확할 뿐더러 공구마멸, 공작물의 재질, 공구의 재질 그리고 절삭조건에 따라서 다른 값을 갖게 된다. 이와같은 시간에 따라서 변하는 계수를 추정하고 GAC에 응용하기 위하여 EWRLS[6,8]법을 통하여 관측식이 식 (4)와 같이 주어질때 매 실험단계마다 절삭계수를 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{\theta}_{n+1} = \hat{\theta}_n + K_{n+1}(y_{n+1} - X_{n+1}^T\hat{\theta}_n) \tag{8}$$

$$K_{n+1} = \hat{P}_n X_{n+1}/(w + X_{n+1}^T\hat{P}_n X_{n+1}) \tag{9}$$

$$P_{n+1} = \frac{1}{w}\left(\hat{P}_n - \hat{P}_n\frac{X_{n+1}X_{n+1}^T}{w + X_{n+1}^T\hat{P}_n X_{n+1}}\hat{P}_n\right) \tag{10}$$

여기서

$$\hat{\theta}_n = \hat{\theta}_n(i) = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\theta_n(i,j) \tag{11}$$

$$\hat{P}_n = \hat{P}_n(i) = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}P_n(i,j) \tag{12}$$

$i = 1, 2, \cdots\cdots, I,\ I = 10$: 구간번호

$j = 1, 2, \cdots\cdots, J,\ J = 10$: 구간내에서의 $P_0 = I/\varepsilon$ (ε은 작은 양수)로 상대적인 측정위치

w : 가중계수

그리고 초기의 행렬 $P_0 = I/\varepsilon$ (ε은 작은 양수)로 정해진다.

식 (1)로부터 직진도 제어의 목적은 $y_t(x, f_0)$를 가능한 0에 가깝도록 유지시키는 것이다. 위치오차는 절삭개시전 밀링베드를 y방향으로 이동시킴으로써 스텝모우터의 분해능 한계에서 보상된다. 그리고 과형오차는 이송속도와 공구휨 사이의 관계식을 이용하여 제어할 수 있고 먼저 방법으로 보상할 수 없었던 잔류 위치오차는 오차값에 따라서 전체적인 이송속도를 조절함으로써 보정할 수 있다. 두 제어방법을 도입하면 식 (1)은

$$\begin{aligned} y_{t,n}(i,j,f) &= d(i,j) + d_{y,n}(i,j,f) + d_{loc} \\ &= (d(i,j) + d_{y,n}(i,j,f) - \bar{d}_{y,n}) \\ &\quad + (d_{loc} + \bar{d}_{y,n}) \end{aligned} \tag{13}$$

여기서

$$\bar{d}_{y,n} = \frac{1}{IJ}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}d_{y,n}(i,j,f)$$

$d_{loc} = NR$: N은 정수이고 R은 이송장치의 분해능이 된다. 식 (13) 오른쪽의 첫항은 과형오차이고 두번째 항은 위치오차이다. 우선 두번째 항을 0으로 놓으면 이송속도의 평균치를 구할 수 있고 이는 절삭전에 보상시켜야 할 위치오차를 나타낸다. 그리고 첫째 항

을 0으로 놓으면 밀링베드 위의 공구의 위치에 따른 이송속도의 변화량을 구할 수 있다. 이로부터 $y_{t,n}(i,j,f)=0$으로 하는 최적 이송속도는

$$f_{n+1}(i,j)=\left(\frac{-d_{loc}-d(i,j)}{\hat{c}_n(i)}\right)^{(1/\hat{q}_n(i))}=\left(\frac{d_{y,n}(i,j)}{\hat{c}_n(i)}\right)^{(1/\hat{q}_n(i))} \quad (14)$$

과 같이 구해진다.

절삭작업에서는 가공정밀도도 중요하지만 생산성도 또한 중요하다. 이런 관점에서 이송속도를 될 수 있는 한 크게하는 것이 좋으나 공구 마멸이나 절삭력의 제한, 채터방지등의 제약조건이 따르게 된다. 다듬질절삭 가공에서는 이들의 제약조건이 보통 한계치 내에 놓이게 되므로 중요하지 않게 된다[10]. 그러나 이송속도는 밀링작업에서 표면조도에 직접 영향을 미치게 되므로 최대 이송속도를 제한하여야 하며, 또한 최소 이송속도는 생산성의 관점에서 그리고 너무 느린 이송속도에서는 표면이 공구에 의하여 긁히는 현상때문에[11] 다음과 같은 이송속도의 제한조건이 필요하게 된다.

$$f_{min}\leqslant f\leqslant f_{max} \quad (15)$$

절삭작업후 처음 절삭 위치로 되돌아 오면서 갭센서를 이용하여 $y_{t,n}(i,j,f)$를 측정하고 이로부터 식 (8~12)을 이용하여 절삭계수를 EWRLS방법으로 새롭게 추정하면서 GAC를 매 가공단계마다 수행한다. Fig. 3은 이와 같은 GAC시스템의 블록선도 이다.

5. 실 험

Fig. 4는 전체적인 실험장치의 개략도이다. 이송속도와 공구의 움직임은 스텝모우터로 제어되고, 공구는 4날 직경 16mm의 고속도강(태화기계, 주)이며 공작물은 508×200×20mm의 ss41 연강판을 사용하였다. 직진도 오차의 측정은 갭센서(Ono Sokki, VT-101)를 통하여 0.2μm의 분해능으로 측정되며 12-bit A/D(MN-ADC-85, 변환시간=8μsec.)변환기로 변환되어 Z-80A 마이크로컴퓨터로 보내진다. 여기서 계산된 제어정보는 PIO-port를 통하여 스텝모우터를 구동시켜서 GAC

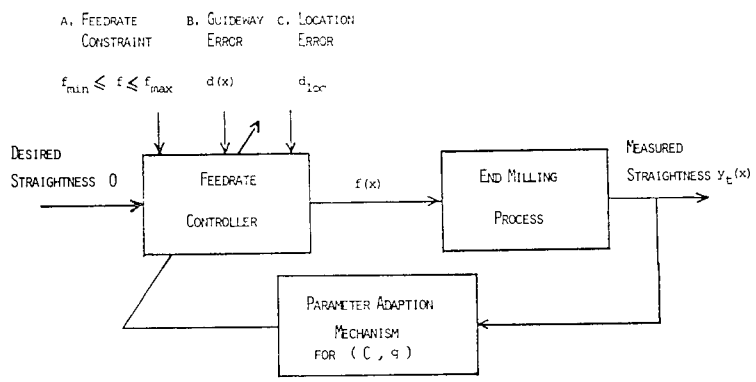

Fig. 3 Block diagram of the geometric adaptive control system for straightness control

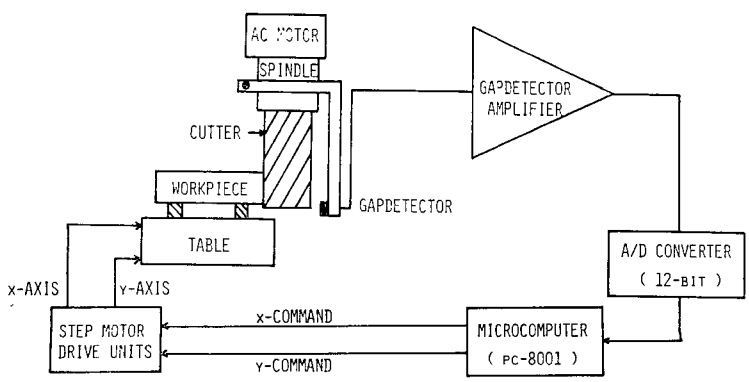

Fig. 4 Schematic diagram of adaptive controlled NC milling machine

를 수행한다. 실제 사용된 실험장치는 Fig. 5에서 볼 수 있다. 절삭깊이를 0.762mm로 한경우 Fig. 6의 1과 2로부터 파형오차는 15μm정도가 되며 두 결과의 유사성으로부터 안내면에 의하여 발생되는 오차는 거의 일정함을 알 수 있다. 절삭깊이와 스핀들 회전수를 변화시킨 경우 Fig. 6의 3과 4에서 마찬가지의 결과를 볼 수 있고 이중의 어느 하나를 제어입력이 없을 때의 가공오차로 간주할 수 있다. 5와 6으로부터 절삭깊이를 매우 작게하여 절삭력에 의한 공구휨의 영향을 거의 배제시킨 경우에도 파형오차는 개선되지 않으며 GAC의 필요성을 입증한다.

3절에서 제시된 방법에 따라서 절삭깊이를 0.381mm로 하고 회전수를 300rpm, 이송속도를 0.0254mm/tooth로부터 0.2769mm/tooth 범위 안에서 0.00254mm/tooth씩 선형적으로 증가시키며 공구휨을 매 5.08mm마다 총 100개를 Fig. 7과 같이 측정한다. 공구의 마멸상태에 따라서 두가지 경우의 공구휨을 볼 수 있는데 1은 5~6번 절삭후의 데이타이고 2는 첫번째 절삭시 얻은 자료이다. 이로부터 공구마멸에 의한 nonstationarity가 크게 작용함을 알 수 있고 1과 2에 해당하는 초기의 공구휨의 수학적 모형은 각각 다음과 같이 된다.

$$d_y = cf^q = e^{5.5395} f^{0.8796} \quad \text{(사용된 공구)} \quad (16)$$

$$d_y = e^{5.004} f^{0.9307} \quad \text{(새로운 공구)} \quad (17)$$

이중 보통 절삭의 경우와 유사한 식 (16)을 초기의 공구휨과 이송속도 사이의 모형으로 선택하였다.

직진도의 온라인(on-line) 측정상의 난점으로 가공후 측정하는 오프라인(off-line)방식을 사용했다. 데이터는 6차의 이산필터를 이용하여 측정주파수 1Hz의 1/8값인 0.125Hz의 cutoff 주파수로 필터링했다. 공구마멸의 영향이 식 (16)과 (17)에서 보듯이 크므로 계수변화에 새로운 절삭시 얻어진 정보의 비중을 크게 하기 위하여 EWRLS의 가중계수를 0.95로하고 초기 행렬 P_0는 $\varepsilon=0.1$로 하여 취했다. 이송속도는 공구형상에 의한 기하학적 표면조도를 1μm이내로 하고 표면에서 공구와의 마찰로 인한 굽힘을 방지하기 위하여

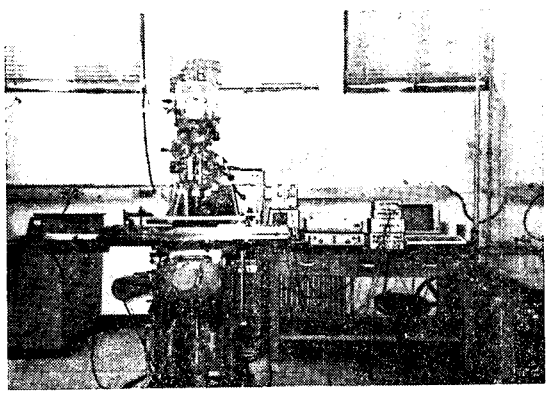

Fig. 5 Overall view of experimental set-up

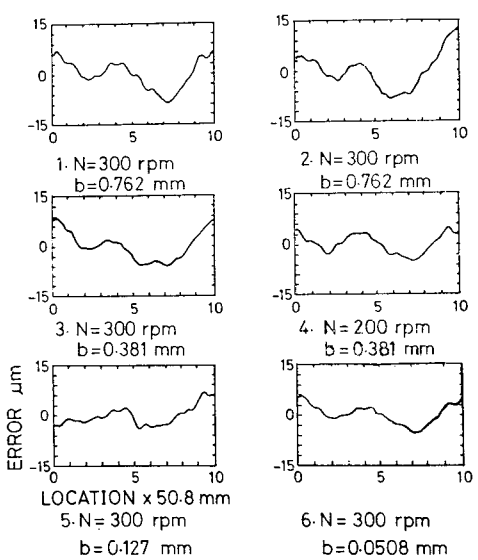

Fig. 6 Waviness error in conventional finish cut (feedrate f=0.127mm/tooth)

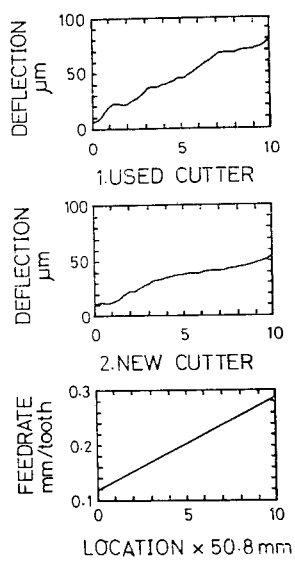

Fig. 7 Tool deflection with respect to Feedrate sweeping(radial depth of cut b=0.381mm, spindle speed N=300rpm, axial depth of cut h=20mm)

Table 1 Experimental conditions

Experimental number	Radial depth of cut(mm)	Axial depth of cut(mm)	Spindle speed (rpm)	Results (figures)
1	0.381	20	300	Fig. 8 and 9
2	0.762	20	300	Fig. 10 and 11
3	0.381	20	200	Reference (8)
4	0.381	20	300	Reference (8)

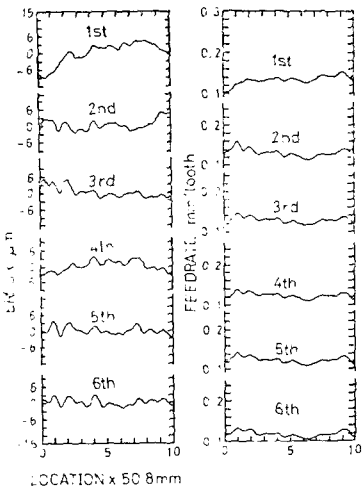

Fig. 8 Waviness error and feedrate input of exp. #1(radial depth of cut b=0.381mm, spindle speed N=300rpm, axial depth of cut h=20mm)

$$0.0635\text{mm/tooth} \leqslant f \leqslant 0.2794\text{mm/tooth} \quad (18)$$

로 했다. 절삭깊이 0.381mm, 이송속도 0.127mm/tooth의 상용 다듬질절삭 조건에서 위치오차는 50μm로 스텝모우터와 볼스크루 조합의 분해능이 25.4μm임을 고려하여 그 정수배인 50.8μm를 베드를 y방향으로 움직여서 보정하고, 이때 잔류의 위치오차와 파형오차는 식(14)에 따라서 보정했다. 넓은 범위의 절삭조건에서 GAC의 타당성과 반복성(repeatibility)을 증명하기 위하여 Table 1과 같은 절삭조건에서 실험을 수행했다.

6. 결과 및 토론

Fig. 8로부터 Exp.#1의 경우 종래의 절삭가공시 15μm정도의 파형오차가 발생하는 대신에 3단계 이후 5μm이하로 그 오차를 줄일 수 있음을 볼 수 있다. 첫

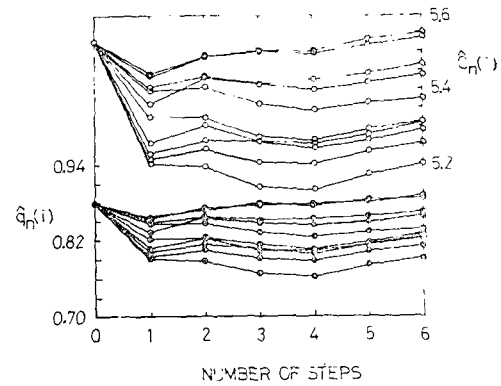

Fig. 9 Cutting parameters in each sections with respect to experimental steps of Exp. #1

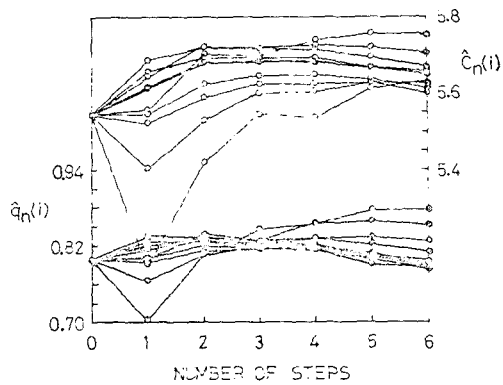

Fig. 10 Cutting parameters in each sections with respect to experimental steps of Exp. #2

단계에서도 종래의 오차보다 더 좋은 결과를 볼 수 있는데 이는 계수의 초기치가 3절에서의 최소오차 자승법을 이용하여 거의 정확하게 구하여졌기 때문이다. 세번째단계 이후로는 오차가 더 이상 감소하지 않았는데 이는 주로 랜덤오차와 모형화 오차 때문이며 여기에는 공구의 마멸 및 공작물의 불균일성 등이 포함된다. 이송속도는 평균치에 대하여 약 20%정도의 범위 내에서 변동되며, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 각 구간 별로 계수들이 서로 다르게 추정되며 이들의 차이로 공구휨을 제어함으로써 파형오차를 보상하게 된다. 위의 실험조건에서 GAC가 일단 수렴된 계수를 갖는 제어식을 사용하여 동일 절삭조건에서 실험을 반복할 때 항상 이에 상당하는 결과를 얻을 수 있음도 확인되었다[8].

절삭깊이의 변화에 따른 GAC의 특성은 Fig. 10에서 보인 바와같이 Exp. #2의 경우에 특히 계수의 수렴정도가 좋지 않게 되는데 이는 공구마멸에 의한 영향을 보상하거나 절삭깊이가 커지면 상향밀링의 경우

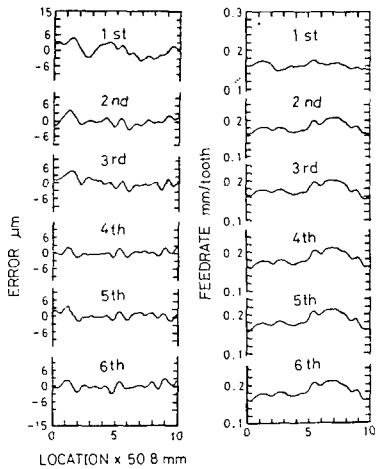

Fig. 11 Waviness error and feedrate input of Exp. #2 (radial depth of cut b=0.762mm, spindle speed N=300rpm, axial depth of cut h=20mm)

에 y방향의 절삭력이 음이 되어 공구가 공작물을 파들어가는 불안정 절삭을 일으키기 때문이다. 다소 수렴속도는 떨어지지만 Fig. 11에서 보는 바와같이 Exp. #1의 경우와 같이 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

스핀들의 회전속도 변화에 따른 GAC는 그 초기의 계수 추정치를 Exp. #1과 같은 값으로 수행하였다. 이 결과 Exp. #1보다도 Exp. #3가 두번째 스텝만에 5μm 이내의 오차범위로 수렴하게 되는데 이로부터 스핀들 회전속도는 공구휨 모형 설정시 무시할 수 있음을 확인할 수 있었으며 그 결과는 Exp. #1과 유사하다[8].

GAC의 반복성(repeatibility)과 제어성(controllability)을 증명하기 위하여 Exp. #1과 동일한 실험을 Exp. #4에서 수행한 결과 그 신뢰도를 확인할 수 있었으며 또한 계수값들은 동일한 실험조건이라 하여도 일정한 값에 수렴하지 않으며 직진도를 개선하기 위하여는 GAC가 수행되어야 함을 증명할 수 있었다[8].

7. 결 론

Taylor의 공구수명식을 이용하여 많은 실험을 거치지 않고 간단하게 이송속도에 따른 공구휨식을 모형화하는 방법을 제시하였다. 또한 엔드밀링 공정중 발생하는 직진도 오차를 위치오차와 파형오차로 구분하여 단지 가공후 측정방법과 EWRLS법을 사용한 GAC방법의 개발로 제어하였으며, 그 우수성을 증명하였다.

비록 절삭계수들이 정확한 실제 계수값에 수렴하지 않는 경우라도 직진도와 최적 이송속도를 구할 수 있었으며, GAC를 이용한 직진도의 개선효과는 5μm이하로 제어되지 않고 결정적인 오차가 절삭단계가 진행됨에 따라서 계속 남게 되는데 이는 오차해석법의 개선이나 더많은 절삭변수들을 고려함으로써 보상시킬 수 있을 것이다.

측정기구의 제약으로 절대적인 직진도 오차를 제어할 수는 없었지만 이는 장치의 개선으로 극복되어져야 할 것이다. 또한 가공후 측정에 의하여 온라인 측정시의 난점은 피하였지만 동일 품종의 다량생산에 적용되는 본 GAC 시스템을 다품종 소량생산에 적용시키기 위하여는 온라인 GAC가 개발되어야 하겠다.

후 기

본 연구는 1984년도 한국과학재단의 연구지원으로 이루어졌으며 이에 감사하는 바입니다.

참 고 문 헌

(1) T. Watanabe and S. Iwai, A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling, J. Engineering for Industry, Trans. ASME Vol. 105, pp. 192~199, 1983

(2) E. Moon, K.F. Eman and S. M. Wu, Simulation Study of Forecasting Compensatory Control of Machining Straightness, the ASME winter annual meeting on the Control of Manufacturing Processes and Robotic Systems, pp. 47~53, Nov. 1983

(3) M. Shiraishi, Geometrical Adaptive Control in NC Turning Operation, J. Engineering for Industry Trans. ASME, Vol. 106, pp. 75~80, 1984

(4) S. Yonetsu, I. Inasaki and T. Kijima, Optimization of Turning Operation, SME Technical Paper, MR 77-202, 1977

(5) 이종원, 분산섭동법에 의한 CNC 보오링 머시인의 적응제어, 대한기계학회논문집, 제 8 권, 제 1 호, pp. 65~70, 1984

(6) G.C. Goodwin and R.L. Payne, Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis, Chap. 7, Academic Press, Inc., 1977

(7) J. Tlusty and P. Mcneil, Dynamics of Cutting

Forces in End Milling, Annals of the CIRP, pp. 20~25, 1975

(8) 이종원, 정성종, 김종선, 수치제어 밀링머시인의 적응제어, 한국과학재단 최종보고서, 1985

(9) H. Sun, S. M. Wu and K.F. Eman, Feasibility of Single-Pass Boring Operations, International Journal of Machine Tool Design and Research Vol. 23, No. 1, pp. 53~59, 1983

(10) V.A. Tipnis, S.C. Buescher and R.C. Garrison, Mathematically Modeled Machining Data for Adaptive Control of End Milling Operations, 4th NAMRC, pp. 279~286, 1976

(11) C.T. Reddy, A. Note on Theoretical Surface Finish in Turning and Milling Operations, International Journal of Production Research, Vol. 19, No. 4, pp. 349~360, 1981