〈논 문〉

정밀 엔드밀링을 위한 실시간 공구처짐 보정시스템

양민양* · 최종근**

(1995년 9월 4일 접수)

On-line Tool Deflection Compensation System for Precision End-milling

Min-Yang Yang and Jong-Geun Choi

Key Words: End Milling(엔드밀가공), Tool Deflection(공구처짐), Machining Surface Error (가공오차), Cutting Force Sensor(절삭력 센서)

Abstract

This paper presents development of a practical toll deflection compensation system in order to reduce the machining error from the tool deflection in the end-milling process. The devised system is a tool adapter which includes 2-axes force sensor for detecting tool deflection and 2-axes tool tilting device for adjusting tool position through computer interface on line process. Experimental in vestigations for typical shaped workpieces representing various end milling situations are performed to verify the ability of the system to suppress the surface errors due to tool deflections. With the system, it is possible to get precise machining surface without any excessive machining error due to increased cutting force in more productive machining conditions.

기 호 설 명

a, b : 최소가공오차 추정식에서 실험상수
$A_{x'}, A_y$: X, Y방향에서의 공구위치 보정량
d_a : 공구 축방향 절입깊이
d_r : 공구 횡방향 절입깊이
$\Delta F_{x'}, \Delta F_y$: 공구 1회전 동안 X, Y 방향에서의 변동절삭력
$E_{\min, y}$: 가공면에 수직한 방향의 추정오차
e : 공구처짐량과 보정량사이의 차를 나타내는 제어목적오차
f : 공구 이송속도[mm/flute]
f_s : 센서신호의 이산화를 위한 표본주파수
$F_{m,x}, F_{m,y}$: 공구 1회전 동안의 X, Y방향 평균절삭력
$K_{p'}, K_i$: 비례 및 적분 제어이득
K_s : 고안된 툴 어댑터 시스템의 강성
R : 엔드밀 공구의 반경
u : 제어기 출력
a_{en} : 공구 이탈점으로부터 측정한 공구 절입각
a_h : 엔드밀 공구에서 절삭날의 비틀림각
β : 하나의 절삭날이 공구 축방향 절입깊이에 해당하는 가공면을 지나는데 필요한 공구 회전각
δ : 엔드밀과 툴 어댑터의 처짐에 의한 보정전 명목가공오차
ϕ : 기준 절삭날의 하단이 가공면 이탈점에 왔을 때를 기준으로 한 공구 회전위치각

*회원, 한국과학기술원 기계공학과
**한국과학기술원 대학원 기계공학과

1. 서 론

절삭가공중 엔드밀링은 금형 및 항공기 산업의 발달과 더불어 기계가공분야에서 매우 중요시되고

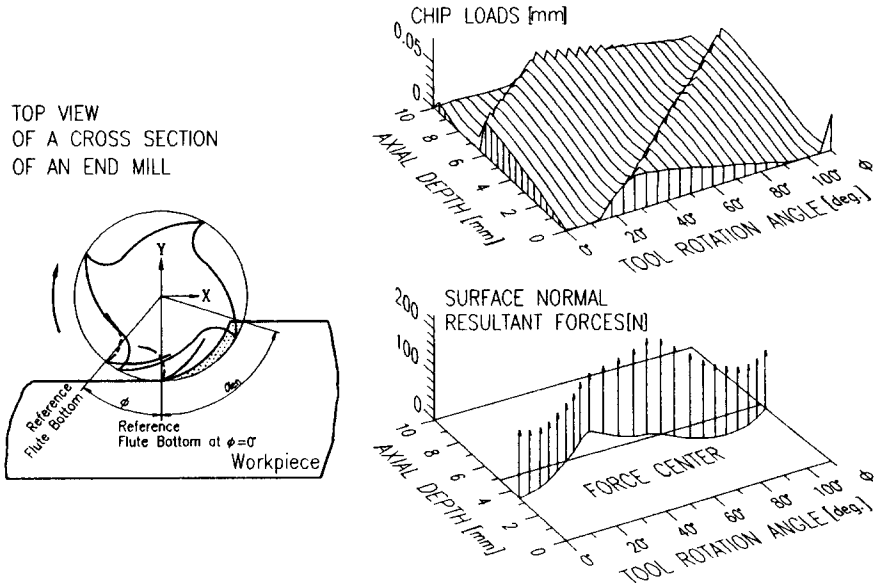

Fig. 1 Chip load distributions and cutting force changes in the cutting with an end mill of 6 mm diameter having 4 flutes of 30 degree helix angle in f=0.03 mm/flute, d_a=10 mm, d_r=2 mm and down cut

있으며, 최근에는 생산성 향상을 위해 종래 EDM을 적용했던 포켓(pocket), 홈(slot) 가공에도 폭넓게 적용되고 있다. 따라서 엔드밀 공정의 고효율화를 위한 많은 연구가 진행되고 특히 가공정도 향상을 위한 공정개발에 적지 않은 노력이 기울여지고 있다.

엔드밀링에 있어서 가공중 엔드밀의 처짐은 가공오차 발생의 주원인으로 작용하여 고정도 가공의 실현에 가장 직접적인 제약이 되고 있다.[1~3] 공구처짐은 가공중 공구에 작용하는 절삭력과 외팔보 형태의 공구형상에 따른 강성 부족에 의해 발생한다. 실제 가공중 처짐량은 절삭력의 크기뿐만 아니라 작용점의 위치에 따라서 달라지며, 특히 가공면에 남게 되는 가공오차는 공구처짐의 방향 및 절삭날과 가공면의 상대적인 위상에 따라 변화된다. 따라서 절삭력과 가공정도 사이에 단순하고 직접적인 관계를 정립하기가 어려우며, 주어진 가공조건에서 공구처짐에 의한 오차를 알고자 할 때 적지 않은 계산이 요구된다. 이를 위한 하나의 방법으로 실험에 의한 측정치를 근간으로 하는 컴퓨터 시뮬레이션이 널리 이용되고 있다.[4~7]

Fig. 1은 30도의 비틀림각을 가진 4날 엔드밀에 의한 하향밀링에서 등간격의 절삭날들이 일정각 회전하면서 격는 절입두께의 변화를 나타낸다. 공구의 회전에 따른 절삭부하의 변동은 절삭력의 크기와 그 분포의 변화를 수반하며 매 순간의 공구처짐을 지배한다. 주어진 가공조건에서 임의의 절삭날은 식 (1)로 주어지는 각도만큼 회전하는 동안 공구축방향 절입깊이에 해당하는 가공면을 형성하게 되며, 이때 가공면위 한점의 가공오차는 매순간 가공면에 수직한 공구처짐과 그때의 절삭날 위치에 의존하게 된다.

$$\beta = -\frac{d_a}{R} \cdot \tan a_h \qquad (1)$$

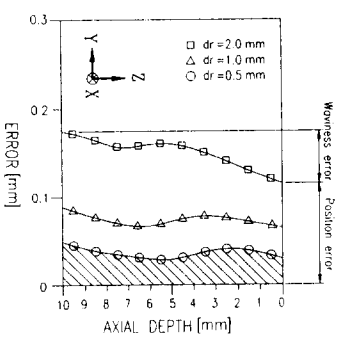

Fig. 2 Machined surface profiles in three radial depth of cuts with an end mill of 4 mm diameter having 4 flutes of 30 degree helix angle in 0.12 mm/rev feed rate, 600 rpm, down cut and A12014-T6 work material

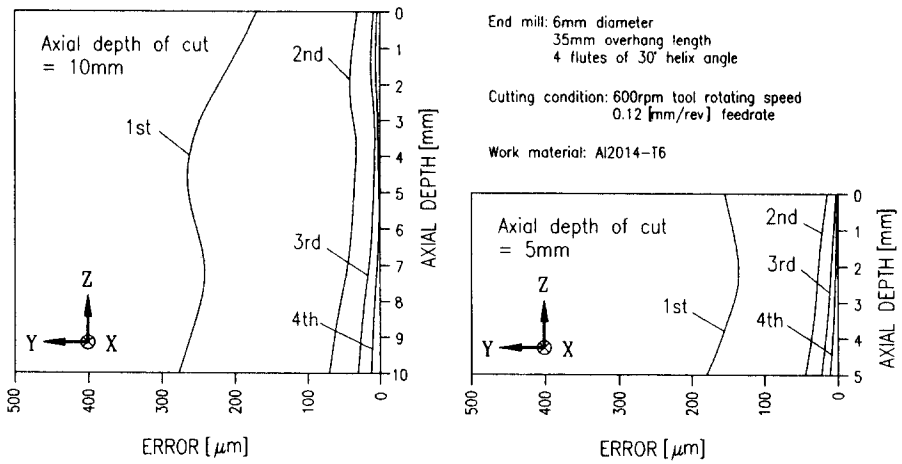

Fig. 3 Reduction of the surface error in repeated cuttings

Fig. 2는 실제 엔드밀링에 의해 얻어진 가공면을 공구이송에 수직한 방향에서 바라본 형상이다. 가공오차는 크게 위치오차(position error)와 굴곡오차(waviness error)로 나누어 볼 수 있으며, 이들의 크기 및 형상은 각각의 절입깊이에 따라 달라진다. 여기서, 위치오차는 공구의 처짐없이 얻어질 수 있는 이상적인 가공면에 대한 평행이동 성분으로서 공구와 가공면 사이의 상대위치 조정으로 제거할 수 있는 양이 된다.[8] 또한, Fig. 3은 엔드밀링에서 나타나는 가공오차 발생의 일면으로 황삭가공후 정삭가공이 추가로 이루어지는 경우의 가공면 형상을 나타낸다. 그림은 최초 2 mm의 횡방향 절입깊이를 가지고 동일한 공구경로로 반복 가공하면서 측정한 가공오차의 감소양상이며, 선행가공에서 나타난 가공오차가 추가가공에서 얻어지는 가공정도에 적지 않은 영향이 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 효율적인 가공정도의 향상을 위해서는 정삭공정 뿐만 아니라 황삭에서도 과다한 오차 발생은 억제되어야 함을 의미한다.

이와 같은 가공오차를 극복하기 위해 흔히 적용될 수 있는 방안은 요구되는 가공정도에 대응하여 절삭력을 어느 설정값 이하로 유지하는 것이다.[9~12] 이러한 방안은 가공정도의 유지 측면에서 효과적으로 이용될 수 있지만, 대개의 경우 가공조건의 완화를 수반하게 되어 공구 자체의 가공능력에 훨씬 못 미치는 비효율적인 가공을 초래한다. 또한 가공중 이송속도, 공구 회전속도와 같은 가공조건의 빈번한 변경은 양질의 표면조도를 유지하는 데도 어려움으로 작용한다.

본 연구에서는 이와 같은 가공오차를 극복할 수 있는 새로운 방안으로서 공구처짐을 실시간 측정하고 이를 보상하는 공구변위를 줌으로써 오차발생을 억제할 수 있는 공구처짐 보정시스템을 실현하고자 하였다. 이러한 시도는 공구자체의 가공능력을 극대화하면서 오차발생은 최대한 억제하여 요구되는 가공정도를 얻고자 하는 것이며, 보다 효율적인 정밀가공을 가능하게 한다. 공구처짐 보정시스템의 실체로서 가공중 공구처짐의 측정 및 보정기능을 갖는 툴 어댑터(tool adapter)를 고안하고, 이를 컴퓨터를 통해 제어하는 적응제어 시스템을 구성하였다. 또한, 시스템 운용방안의 일환으로 측정된 절삭력으로부터 공구위치 보정량 산출에 이르는 방안을 제시하였다. 구성된 시스템에 대한 성능실험에서 먼저 설계, 제작된 절삭력센서의 동작특성이 조사되었으며, 시스템의 가공오차 억제능력을 검증하기 위한 보정실험이 이루어졌다.

2. 공구처짐 보정시스템

2.1 시스템 설계 및 구성

본 연구에서는 가공중 공구처짐보정이 공작기계의 주축에 설치되는 툴 어댑터에서 이루어지도록 하였다. 구체적인 보정방법으로는 공구끝으로부터 얼마간 떨어진 공구축위의 한점을 중심으로 한 공구틸팅(tool tilting)이 적용되었다. 공구틸팅은 위치오차 제거 외에도 일반적인 가공오차 발생 양상에서 나타나는 사다리꼴형상의 오차(즉, 공구의 바닥부분에서의 오차가 공작물 상면에서의 오차보다

큰 경우) 제거에도 도움이 된다는 점에서 단순한 공구이동을 대신하여 적용되었다. 또한 고안된 툴 어댑터는 공구틸팅장치 외에 고안된 절삭력 센서를 내장하여 측정과 제어동작이 하나의 시스템으로 구성될 수 있도록 하였다.

Fig. 4는 엔드밀의 횡방향으로 작용하는 절삭력을 측정하기 위해 고안된 툴 어댑터 내장형 절삭력 센서이다. 평행평판의 변형원리와 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한 것으로 2방향의 절삭력이 독립적으로 측정될 수 있는 구조이고,[13,14] 특히 구조적 간결성을 위해 툴 홀더(tool holder)를 중앙의 구멍을 통하여 장착할 수 있도록 하였다. 또한, 공구에 작용된 힘은 툴 홀더와 이를 지지하고 있는 베어링을 통하여 컴플라이언스(compliance)에 전달되므로 회전공구에 작용되는 힘을 고정부에서 측정할 수 있는 형태가 되며, 이는 기존의 슬립 링(slip ring)이나 원격계측(telemetry) 등의 적용에서 오는 여러 가지 어려움을 극복해 준다.

Fig. 5는 공구처짐을 보정하기 위해 고안된 2축 공구틸팅기구의 개략도이며, 2개의 모터를 제어하므로써 가공중 공구에 미소 변위를 줄 수 있게 된다. 그림에서 모터의 회전은 이에 부착된 캠기구의 동작에 따라 틸팅 레바(tilting lever)의 직선운동으로 전환되며 이때 레바의 운동은 공구위치보정에 요구되는 정밀도를 얻을 수 있도록 세밀하여지고, 전달력 또한 공구 처짐력을 이길 수 있을 만한 큰 힘으로 증폭된다. 다시 틸팅 레바의 직선운동은 구면 베어링에 전달되어 각운동으로 전환되며, 이때 구면 베어링의 중심에 위치하여 공작기계의 주축과 플랙시블 커플링(flexible coupling)으로 연결된 툴 홀더는 오차억제에 필요한 위치이동을 얻을 수 있게 된다. 실제 이러한 동작은 서로 직교하는 위치에 설치된 2조의 캠기구에 의해 구면 베어링에 전달되므로 구면 베어링에 의한 두 방향의 각 변위는 공구처짐이 발생하는 임의의 모든 방향으로의 필요한 보정을 가능하게 한다. 또한 여기서 요구되는 각변위는 1도 이하의 작은 값이므로 강체의 다축에 의한 회전시 발생하는 회전순서에 따른 변위차는 충분히 작아 무시될 수 있다. 30 mm의 물리지 않는 공구길이(effective tool length)를 갖는 공구의 경우, 본 장치를 통하여 구동 스텝핑 모터(stepping motor)의 1스텝(0.9도)당 얻을 수 있는 분해능은 4 μm이며, 동작 가능한 최대보정량은 0.8 mm이다.

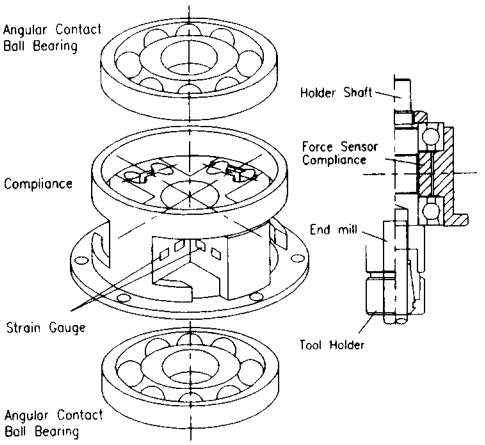

Fig. 4 Compliance for the divised force sensor

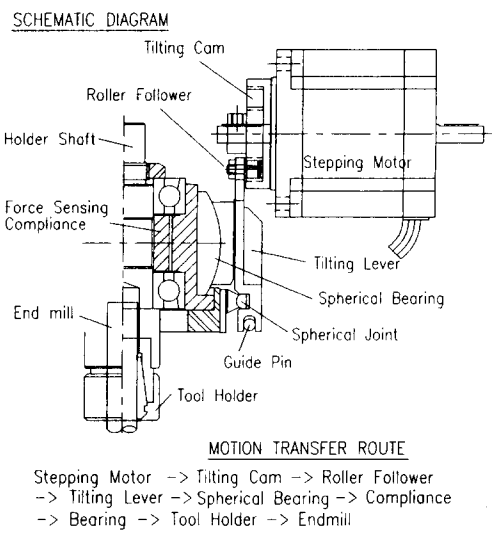

Fig. 5 Tool tilting device

이상의 핵심요소를 기반으로 구성된 공구처짐 보정시스템은 절삭력측정과 공구위치 보정기능을 갖는 툴 어댑터와 이들로부터 출력되는 정보를 분석하고, 시스템 제어에 필요한 구동명령을 출력하는 컴퓨터 시스템으로 이루어지며, 이들 전체구성은 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같다.

2.2 시스템 제어

본 시스템을 제어하기 위한 블록선도(block diagram)은 다음 Fig. 7과 같다. 여기서 제어의 목적은 공구처짐과 현재의 보정량 사이의 편차 e를 0으로 하는 것이며, 실제 이 값은 보정의 중간단계

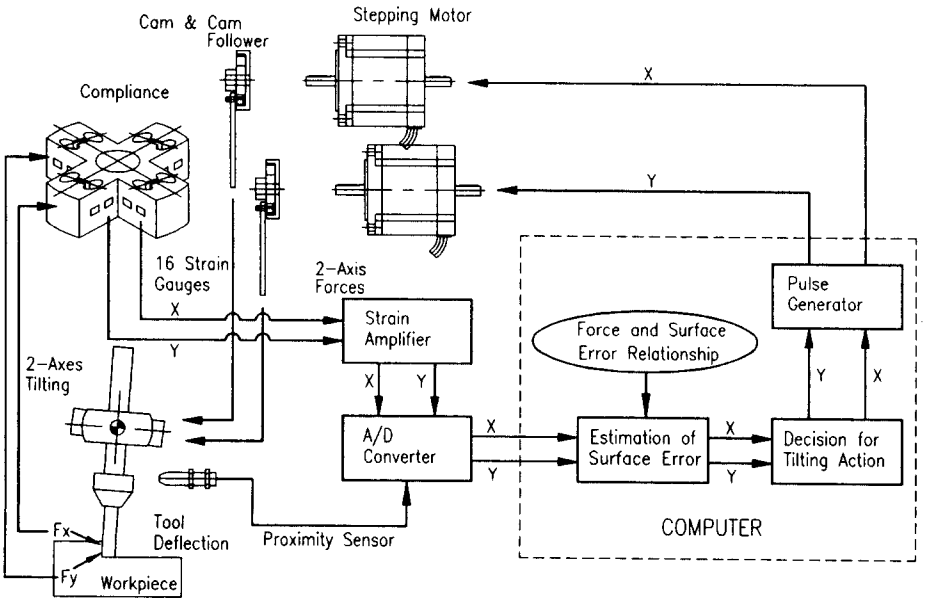

Fig. 6 System configuration

에서 추가로 보정되어야할 값을 의미한다. 이를 위해 식 (2)와 같은 디지털 PI 제어기가 컴퓨터에 의해 구현되었다. 여기서, $u(z)$는 제어모터 구동을 위한 제어기 출력이고, K_p, K_i는 각각 비례 및 적분 이득이다.

$$u(z)=\left(K_p+\frac{K_i}{1-z^{-1}}\right)\cdot e(z) \tag{2}$$

한편, 위의 제어 동작과정에서 0의 기준입력(reference input)에 대한 편차 $e(z)$을 얻기 위해서는 공구처짐 오차에 상응하는 값 δ를 필요로 한다. 이 값은 본 시스템이 추구하는 제어목표가 되므로 이의 선정은 매우 중요하며, 이에 부합되는 값으로 과절삭 없이 오차를 최대로 보정할 수 있는 한 단면에서의 최소가공오차(E_{min})를 적용하였다. 여기서 최소가공오차는 공구처짐없이 가공되는 가상의 가공면으로부터 측정되는 실제 가공면까지의 최소거리를 의미하며, 앞서 Fig. 2에서 정의된 위치오차와 동일한 양이 된다.

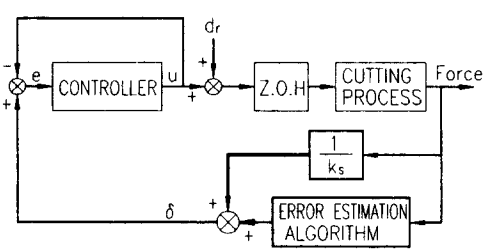

Fig. 7 System block diagram

한편, 이와 같은 형태의 제어문제, 즉 기하학적 적응제어에 있어서 시스템이 가공량에 대한 정확한 정보를 갖기는 어려우며, 이는 가공전 피삭재가 균일한 형상을 갖기 어렵다는 보편화된 사실에 기인한다. 이는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 절삭력이나 가공오차 등의 계산에서 흔히 요구되는 횡방향 및 축방향 절입깊이를 알 수 없음을 의미한다. 따라서 실제 보정량의 결정은 이들에 대한 정보없이 손쉽게 얻어지는 정보만으로 이를 추정하는 것이 바람직한 제어형태라고 할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 절삭력의 평균적인 크기가 가공오차의 전체적인 크기를 지배하고, 다만 절삭력의 변동치(fluctuation)가 커질 때 그에 따른 가공오차의 변동도 커지게 되어 최소가공오차는 상대적으로 감소된다는 점을 착안하여 다음 식 (3)과 같은 실험식으로 이를 근사화하였다.

$$E_{min,\,y}=a\cdot F_{m,\,y}-b\cdot \Delta F_y \tag{3}$$

이 식에서 상수 a, b는 사용공구의 형상, 피삭재의 경도 등에 의해 영향받으며, 절입깊이가 변화하는 여러 가공조건에서의 실험결과로부터 최소자승법을 적용하여 결정될 수 있다. 따라서 식 (3)은

주어진 공구, 피삭재에 대하여 가공중 절입깊이가 임으로 변화하는 가공에서 최소가공오차를 제공한다. 또한, 이와 같이 선형화된 형태는 가공면의 공구에 대한 상대적 위치가 측정된 절삭력의 주된 방향(principal direction)과 일치하지 않은 경우에도 여기에서 적용하는 2축 제어에 의해서 유효하게 사용될 수 있다. 이 점은 공구처짐의 보정에 있어서 공구에 대한 가공면의 방향을 알 수 없는 상황에서 필요한 보정을 가능하게 하며, 시스템의 적용성을 높이는 특성이다.

제시된 최소가공오차 추정식에 대한 효용성을 알아보기 위하여 준비된 2가지 시편에 대한 검증실험을 행하였다. 실험에서 공구는 지름 ϕ6 mm, 날길이 30 mm, 비틀림각(helix angle) 30도를 가진 4날 고속도강(HSS) 엔드밀이 사용되었으며, 콜릿(collet)을 이용하여 자유선단의 길이가 30 mm가 되도록 고정하였다. 가공조건은 공구 회전속도 600 rpm, 이송속도 72 mm/min, 하향절삭(down cut)으로 하였다. 가공후 공작물의 가공오차 측정은 직경 ϕ0.5 mm의 프로브(probe)를 가진 분해능 0.1 μm의 디지털 인디케이터(digital indicator)를 가지고 컴퓨터와의 인터페이스를 통하여 이루어졌다. 가공과 측정의 결과가 Fig. 8, Fig. 9에 보여 지며, 여기서 선행된 실험을 통하여 식 (3)에서의 인자 a, b에 대한 값으로서 각각 1.05E-3과 0.45E-3이 적용되었다. 그림에서 상단은 가공면 수직방향의 평균절삭력과 변동절삭력, 그리고 이들을 이용한 식 (3)에 의한 추정치를 나타내었고, 하단에서는 가공면에 대한 가공오차를 측정하여 그 추정치와 비교하였다. Fig. 8은 시편의 형상이 공구축방향의 절입깊이는 일정하게 유지되고 횡방향 절입깊이는 지속적으로 증가하는 경우이다. 그 결과에서 가공중 평균절삭력은 가공부하의 증가와 더불어 증가되고, 변동절삭력은 보다 가파르게 증가하다가 횡방향 절입깊이가 대략 1 mm를 넘어서면서 둔화되는 모습을 보여 준다. 추정치와 측정치의 비교에서는 이들이 어느 정도 일치되는 결과를 나타내었다. 한편, Fig. 9는 횡방향 절입깊이는 일정하고 축방향 절입깊이가 변화하는 형상을 갖는 경우이다. 변동절삭력의 변화양상을 보면, 평균절삭력의 증대에도 불구하고 거의 일정하게 유지되다가 특히 공구 축방향 절입깊이가 8 mm 정도되는 근처에서 현저히 감소된 후 다시 증가되는 형태로 나타났다. 실제 측정치와의 비교를 보면, 전체적인 변화양상 측면

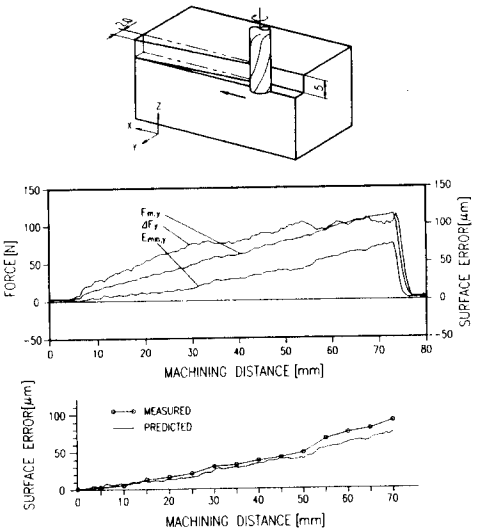

Fig. 8 Validity test for the estimation equation of the minimum surface error (1)

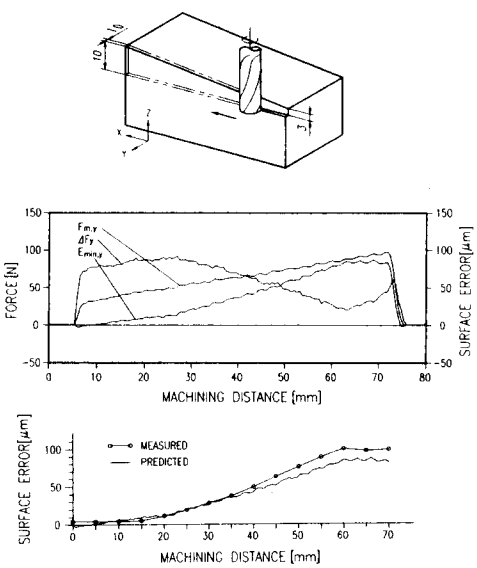

Fig. 9 Validity test for the estimation equation of the minimum surface error (2)

에서는 긍정적이나 한편으로 그 절대값에 있어서 얼마간의 차이를 보이고 있는 점은 이에 대한 보완적인 고찰이 필요하다고 하겠다. 그러나 전체적으로 본 실험을 통하여 측정된 절삭력으로부터 최소가공오차를 추정하는 식 (3)은 본 연구에서 필요로 하는 값에 대한 근사치를 제공하는 것으로 생각될 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 절삭력센서 보정

설계, 제작된 절삭력센서의 보정을 위해 Kistler 공구동력계(dynamometer)를 이용하여 상대부하를 주고 동시에 출력된 값을 비교한 결과 Fig. 10과 같았다. 실험에서 가한 힘의 방향과 나란한 일차측 출력은 양호한 선형관계를 나타내었고 힘의 방향과 수직한 2차측 출력은 거의 0에 근접되었으며, 특히 축간의 간섭면에서 Kistler 공구동력계보다 우수하였다. 또한 고안된 절삭력센서의 동적특성을 알아보기 위하여 가속도계를 이용한 충격응답(impulse response) 실험을 하였으며, Fig. 11은 그 결과로서 얻어진 주파수 응답이다. 그림에서 나타난 2개의 정점(peak)은 센서의 2방향 최초 공진주파수이며, 각각 574, 612 Hz로 나타났다. 한편, 일반적인 엔드밀링에서 절삭날 이동주파수(flute passing frequency)는 20~150 Hz 정도이므로(예로서 4날 엔드밀이 1200 rpm에서 사용되는 경우 80 Hz가 된다.) 제작된 절삭력센서가 엔드밀링중 절삭력 측정에 충분한 동적특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

3.2 공구처짐 보정실험

앞서 기술된 시스템 구성요소 및 운용 알고리듬을 기반으로 구축된 보정시스템을 이용하여 가공중 공구처짐에 의한 오차발생을 억제하는 실험이 이뤄졌으며, Fig. 12는 본 시스템을 적용한 전형적인 가공모습을 보여 준다. 실험에서 공구와 가공조건 그리고 가공후 측정은 앞서 최소가공오차 추정실험에서 사용된 조합을 사용하였다. 또한 선행된 실험을 통하여 식 (2)에서 주어진 제어이득(control gain) K_p와 K_i는 각각 0.15, 1.0으로 설정하였다.

시편은 실제 가공에서 발생할 수 있는 여러 가공상황중에서 이들을 대표할 수 있는 몇 가지 형태로 준비되었으며, Fig. 13은 이들을 보여 준다. Fig. 14, Fig. 15 및 Fig. 16은 이들 각각의 시편에 대한 실험 결과로서 상단은 절삭력 신호와 시스템에 의한 보정출력을 모니터한 결과이고, 하단은 가공후 측정된 가공오차를 보정시스템을 적용하지 않은 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 가공오차의 측정은 주어진 가공위치에서 가공면을 공구 축방향으로 측정하여 그 때의 최소값을 그 위치에서의 대표 오차값으로 나타낸 것이다.

Fig. 14에서 가공부하의 점진적 증대에 따른 절삭력 신호의 변동양상은 가공오차의 증가를 의미하며, 이러한 시스템의 판단에 의해서 보다 큰 보정신호를 출력하고 있다. 가공후 측정결과는 시스템을 적용하지 않은 경우, 가공오차가 가공부하의 증가에 따라 200 μm까지 크게 발생된 반면, 보정시스템 적용시에는 20 μm 내지 30 μm 이하로 억제되고 있음을 보여 준다.

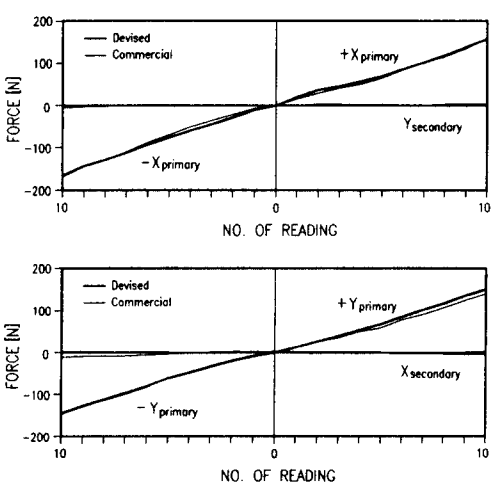

Fig. 10 Static calibration of the devised force sensor

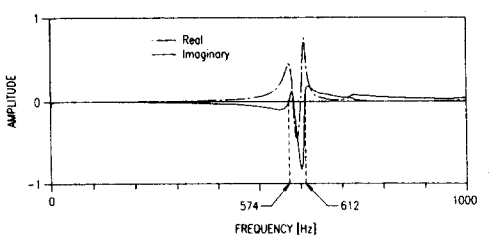

Fig. 11 Impulse response of the devised force sensor

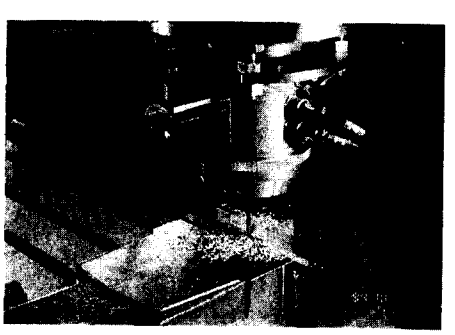

Fig. 12 A typical machining using the system

Fig. 15의 상단에 보여지는 시편의 가공결과에서 가공부하의 단계적 증가에 따라 평균 절삭력($F_{m,y}$)은 증가되었으나 변동절삭력(ΔF_y)는 횡방향 절입깊이가 1.0 mm 이상인 영역에서는 거의 비슷한 값으로 유지됨을 볼 수 있다. 가공오차의 측정결과를 보면, 보정시스템의 사용으로 전체적으로 크게 감소되었고, 또 다른 특징으로는 가공부하가 클수록 오히려 오차발생이 감소된 것으로 나타났다. 그러나 그림에서 보여지는 결과는 가공오차의 최소값이므로, 실제 가공면의 단면형상이 Fig. 2에 나타난 바와 같이 가공부하가 큰 경우의 공구 축방향 오차변동(굴곡오차)이 대체로 커진다는 점을 고려하면 가공부하가 상대적으로 큰 가공영역에서 더 좋은 가공정도가 얻어졌다고는 할 수 없다. 하지만 여기서도 시스템의 적용의 오차발생의 효과적으로 억제되었음을 알 수 있다.

Fig. 16은 가공중 가공부하는 일정하게 유지되나 공구처짐 방향이 계속적으로 변화하는 경우의 결과로 두 방향의 절삭력 신호가 사인파(sine wave)의 형태로 측정되고 공구처짐 보정도 이와 유사한 형태로 이루어졌다. 가공오차의 측정결과에서는 시스템의 비적용시 온둘레에 걸쳐 80 μm 정도 발생하던 오차가 시스템의 사용으로 20 μm 내외로 억제되었음을 보여 준다.

한편, Fig. 17은 Fig. 15에서 적용된 가공시편에 대하여 각각의 단계면에서 대한 공구 축방향으로의

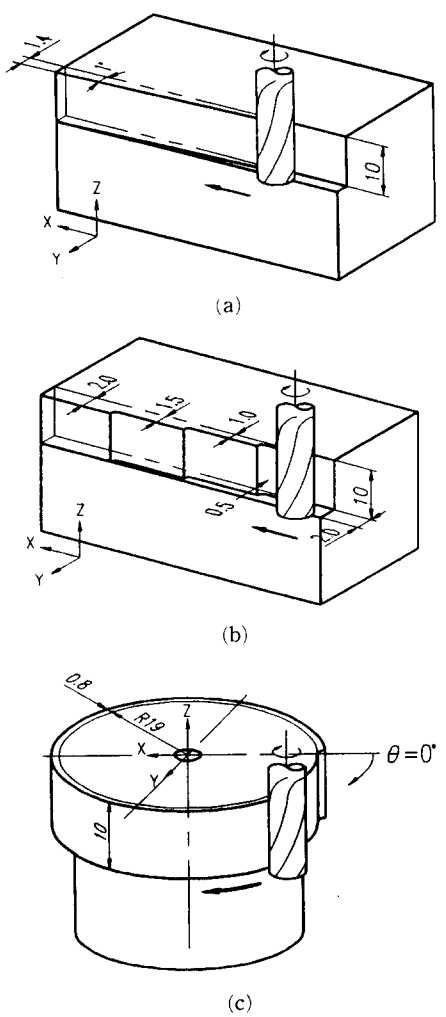

Fig. 13 Specimens for the tool deflection compensation tests

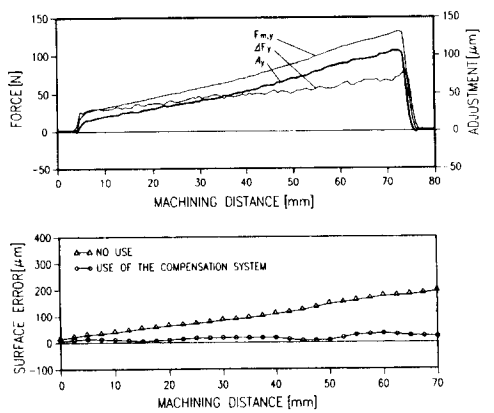

Fig. 14 Tool deflection compensation tests and machined surface errors in the case of using vs. non using of the system for Specimen (a) in Fig. 13

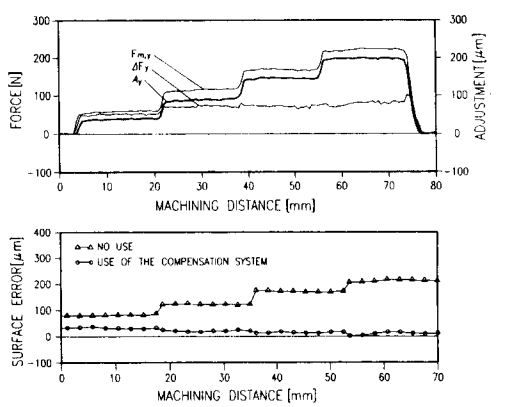

Fig. 15 Tool deflection compensation tests and machined surface errors in the case of using vs. non using of the system for Specimen (b) in Fig. 13

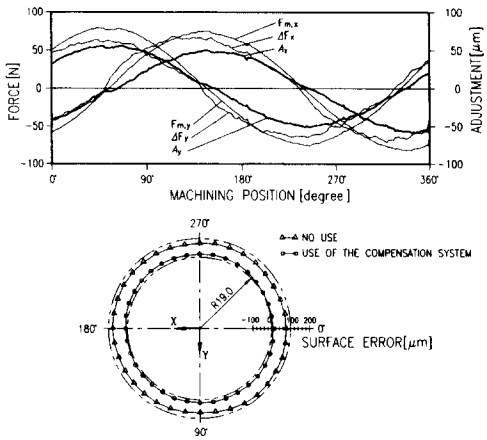

Fig. 16 Tool deflection compensation tests and machined surface errors in the case of using vs. non using of the system for Specimen (c) in Fig. 13

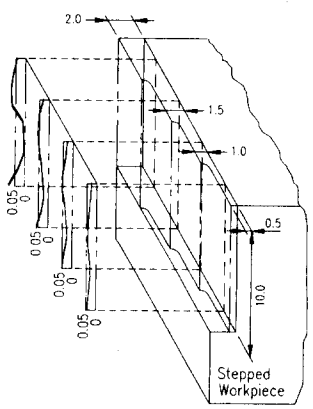

Fig. 17 Machined surface profiles by the compensation

가공면 측정결과를 나타낸다. 그림에서 횡방향 절입깊이가 증가할 때 가공오차는 절삭력에 대응하는 공구 보정에 의해 비슷하게 유지되며, 다만 굴곡오차가 커지는 경향이 있으나 그 양은 크지 않음을 알 수 있다. 이는 축방향 가공오차가 절삭력의 절대적인 크기 보다는 절삭력 변동의 크기에 밀접한 관계가 있음을 나타내는 예라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 엔드밀링시 발생되는 공구처짐에 의한 가공오차를 최소화하는 방안으로서 공구처짐 보정시스템이 구현되었으며, 몇 가지 실험을 통하여 이의 성능을 검증하였다. 검증과정을 통하여 얻어진 몇 가지 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 실용화 관점에서 설계, 제작된 절삭력 센서는 툴 홀더를 내부에 장착하여 회전공구에 작용하는 힘을 비회전부에서 효과적으로 측정할 수 있는 구조로서 본 연구에서 매우 유용하게 사용되었다.

(2) 실시간 측정되는 절삭력의 평균값과 변동값으로부터 공구처짐에 의한 최소가공오차의 추정이 근사적으로 이루어졌으며, 시스템 운용에 효과적으로 적용될 수 있었다.

(3) CNC 컨트롤러와는 독립적으로 동작, 제어되는 공구처짐 보정시스템은 여러가지 형태로 변화하는 시편형상에 대하여 적절히 대응하였으며, 가공조건의 완화없이 공구처짐에 의한 가공오차 발생을 효율적으로 억제할 수 있었다.

참고문헌

(1) Budak, E. and Altintas, Y., 1994, "Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy," *Int. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 7, pp. 907~918.

(2) Kline, W. A., Dever, R. E. and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.

(3) Matsubara, T., Yamamoto, H. and Mizumoto H., 1987, "Study on Accuracy in End Mill Operations(1st Report)-Stiffness of End Mill and Machining Accuracy in Side Cutting-," *Bull, Japan Soc. of Prec. Engg.*, Vol. 21, No. 2, June, pp. 95~100.

(4) Armarego, E. J. A. and Deshpande, N. P., 1991, "Computerized End-Milling Forces Predictions with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 25~29.

(5) Ber, A., Rotberg, J. and Zombach, S., 1988, "A Method for Cutting Force Evaluation of End Mills," *Annals of the CIRP*, Vol. 37/1, pp. 37~40.

(6) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME Journal of Engineering for*

Industry, August, Vol. 104, pp. 272~278.

(7) Sutherland, J. W. and Dever, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME Journal of Engineering for Industry*, November, Vol. 108, pp. 269~279.

(8) Watanabe, T. and Iwai, S., 1983, "A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, September, Vol. 105, pp. 192~199.

(9) Altintas, Y., 1994, "Direct Adaptive Control of End Milling Process," *Int. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 4, pp. 461~472.

(10) Yazer, Z., Koch, K. F., Merrick, T. and Altan, T., 1994, "Feed Rate Optimization Based on Cutting Force Calculations in 3-Axis Milling of Dies and Molds with Sculptured Surfaces," *Int. Mach Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 3, pp. 365~377.

(11) Lauderbaugh, L. K. and Ulsoy, A. G., 1989, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling," *Journal of Engineering for Industry ASME*, February, Vol. 111, pp. 13~21.

(12) Yang, M. Y. and Sim, C. G., 1993, "Reduction of Machining Errors by Adjustment of Feedrates in the Ball-End Mill Process," *Int. J. Prod.*, Vol. 31, No. 3, pp. 665~689.

(13) Tani, Y., Hatamura, Y. and Nagao, T., 1983, "Development of Small Three-component Dynamometer for Cutting Force Measurement," *Bulletin of the JSME*, Vol. 26, No. 214, April, pp. 650~658.

(14) Oraby, S. E. and Hayhurst, D. R., 1990, "High-Capacity Compact Three-Component Cutting Force Dynamometer," *Int. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, No. 4, pp. 549~559.

(15) Kolarits, F. M. and DeVries, W. R., 1991, "A Mechanistic Dynamic Model of End Milling for Process Controller Simulation," *ASME Journal of Engineering for Industry*, May, Vol. 113, pp. 176~183.

(16) Yang, M. Y. and Park, H. D., 1991, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," *Int. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, No. 1, pp. 45~54.

(17) Liang, S. Y. and Perry, S. A., 1994, "In-"Process Compensation for Milling Cutter Runout via Chip Load Manipulation," *ASME Jounral of Engineering for Industry*, May, Vol. 116, pp. 153~160.

(18) 김종원, 김태용, 1995, "견실한 적응기를 이용한 절삭력 제어" 한국정밀공학회지, 제12권, 제4호, pp. 55~66.

(19) Shiuh-Jer Huang and Mu-Tyan Yan, 1993, "Theoretical and Experimental Study of PI Control for Converted Traditional Milling Machines," *Int. Mach. Tools Manufact*, Vol. 33, No. 5, pp. 695~712.