

## 엔드밀의 코너 가공시 가공 정밀도 향상에 관한 연구

김 용 현\* · 고 성 립\*

(2000년 4월 6일 접수, 2000년 12월 8일 심사완료)

### Improvement of the Accuracy in Cornering Cut Using End Mill

Yong-Hyun Kim and Sung-Lim Ko

**Key Words:** End Mill(엔드밀), Cornering Cut(코너 가공), Radial Depth(반경방향 절삭깊이), Resultant Cutting Force(절삭 합력), Feed Rate(이송량)

#### Abstract

The Surface, generated by end milling operation, is deteriorated by tool runout, vibration, friction, tool deflection, etc. Especially in cornering cut, surface accuracy is usually determined by varying cutting forces, which causes tool deflections. Cutting conditions like feed rate is usually kept constant during machining a part, which causes dimensional error in severe cutting. Cornering cut is a typical example of deterioration of surface accuracy when constant feed rate is applied. Therefore it becomes important to develop NC post processor module to determine optimal cutting conditions in various cutting situations. In this paper, cutting force is predicted in cornering cut with flat end mill and feed rate is determined by constraining constantly resultant force. Also some control characteristics of CNC machining center are evaluated.

#### 1. 서 론

현재 사용되고 있는 상용 CAM 소프트웨어는 도면으로부터 제공된 기하학적 형상 정보만을 고려하여 공구의 이송경로를 생성한다. 따라서 CAM에서 생성된 NC 코드를 사용하여 가공하는 경우 표면의 가공오차를 허용범위 내로 유지하기 위한 가공 조건 선정에는 제한적일 수밖에 없다. 특히, 포켓 가공의 코너부와 같이 절삭 조건이 좁은 구간에서 급격하게 변하는 구간에서는 절삭력의 증가로 인한 공구의 떨림(chatter), 휨(deflection), 공구 마모, 공구 파손 등 정밀도 저하

의 문제가 발생하게 된다. 엔드밀을 사용하여 가공하는 영역이 확대됨에 따라 정밀 가공의 필요성과 생산성의 증대가 주요 관심사가 되고 있다. 따라서 표면 정밀도와 표면 거칠기를 허용 공차 이내로 유지하고 공구의 파손을 방지하면서 가공 시간을 단축할 수 있는 최적 절삭조건을 선정해 주어야 하는데, 현재로서는 작업자의 경험에 의존하고 있다. 그러므로 이러한 가공 조건이 변하는 부분에서의 가공 정밀도를 높이기 위하여 적정 절삭조건을 선정해주는 NC Data 후처리 모듈의 필요성이 증대되고 있는 실정이다.

코너에서의 가공은 보다 복잡한 메커니즘을 갖고있으며, 코너에서의 가공 정밀도를 높이기 위한 연구가 여러 방면에서 진행되어왔다. Iwabe<sup>(1)</sup> 등은 제한적이나 코너부에서의 절삭량과 직선부에서의 절삭량이 같도록 전가공면(황삭)의 형상을 개선하여 가공 정밀도의 향상을 꾀하였다. 또한 적응제어법으로 이송량을 제어함으로써 가공 정밀도를 개선할 수 있음을 보여주었다. 온라인(적응제어)에 의한 정밀도 개선에 관한 연구는 이외

† 책임저자, 회원, 건국대학교 대학원 기계설계학과

E-mail : therisa@konkuk.ac.kr

TEL : (02)2201-3718 FAX : (02)447-5886

\* 회원, 건국대학교 기계설계학과

에도 Tlusty<sup>(2,3)</sup> 등 다수에 의해 진행되어 왔다. 또한 가공 형상의 기하학적 조건으로부터 코너 가공의 진행에 따른 절삭력을 예측하여 offline에서 코너 가공에 적절한 이송량을 설정해주는 접근도 있어왔다.<sup>(4)</sup> Tarn<sup>(5)</sup>은 가공 정밀도 향상을 위해 평균 절삭력을 일정하게 유지하도록 하는 이송량을 결정하는 방법을 제안하였다. 이 밖에 절삭력 선도를 이용하여 절삭력을 효율적으로 예측하고, 예측된 절삭력을 이용하여 NC 프로그램의 검증 시스템으로 응용한 예가 있다.<sup>(6)</sup>

본 논문에서는 코너 가공에서의 가공 정밀도 향상을 위한 NC Data 후처리 모듈 개발의 일환으로 기존의 CAM으로부터 생성된 NC 코드를 바탕으로 코너에서의 가공 정밀도 향상에 관한 연구를 수행하였다. 코너 가공에서의 가공 정밀도 향상을 위해서는 코너부에서의 절삭 특성에 대한 파악 및 절삭 거동을 정확하게 예측할 수 있어야 한다. 코너부에서의 절삭력을 예측하는 데에는 반경방향 절삭깊이의 변화에 따른 비절삭저항  $k_1, k_2$ 의 효율적 선정문제, 절삭력의 방향이 바뀔 때 따른 치질의 문제 등 변화하는 가공 특성에 대한 파악과 적절한 대안이 제시되어야 한다. 또한, 코너에서의 가공 정밀도를 높이기 위하여 적정 이송량 설정에 관한 연구를 수행하였다. 이송량 제어는 CNC머신의 가감속 제어 특성과 연관 있는 문제이므로 다양한 조건에 대하여 제어 특성 파악을 위한 실험을 수행하였다.

## 2. 가공 형상 예측 모델

### 2.1 절삭력 모델

절삭력 예측 모델에는 크게 평균 절삭력 모델과 미소 절삭력 모델의 두 가지가 있다. 평균 절삭력 모델은 Wang<sup>(7)</sup>이 제안한 것으로, 공구의 이송에 의하여 제거되는 공작물의 단위시간당 절삭량(material removal rate)에 단위체적당 작용하는 비절삭저항을 곱하여 평균 절삭력을 구하는 방식이다. 반면 Kline<sup>(8)</sup> 등은 가공에 참여하는 절삭날을 미소요소로 나누어 각 미소 절삭날에 작용하는 절삭력의 총합으로 절삭력을 계산하는 미소 절삭날 모델을 제안하였다. 평균 절삭력 모델은 계산시간이 빠르다는 장점이 있는 반면 정확하지 못하다는 단점이 있고, 미소 절삭날 모델은

반대의 특징이 있다. 본 연구에서는 코너에서의 정확한 절삭 거동의 예측을 위해 미소 절삭날 모델을 사용하였다.

다양한 공구 형태에 대한 임의의 각위치에서의 칩두께를 구하기 위해서 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 엔드밀의 절삭날은 축방향 표면을 따라 나선형으로 존재하고, 엔드밀의 절삭 과정을 2차원 절삭으로 단순화하기 위하여 날부가 축 방향을 따라 잘게 나뉘어져 있다고 가정한다. 식 (1)에서  $f_t$ 는 날 당 이송량이고,  $\beta(i, j, k)$ 은 기준각에서 임의의 미소요소까지의 각위치를 나타낸다.

$$t_c(i, j, k) = f_t \sin \beta(i, j, k) \quad (1)$$

Tlusty<sup>(2)</sup>는 비절삭저항의 개념을 도입하여 축방향 두께가  $D_z$ 인 미소 절삭날에 작용하는 접선 성분과 법선성분의 절삭력에 대하여 미소 절삭력의 형태로 나타내었다.

$$dF_t = k_1 \cdot t_c \cdot D_z \quad (2)$$

$$dF_r = k_2 \cdot k_1 \cdot t_c \cdot D_z \quad (3)$$

식에서  $k_1$ 은 비절삭 저항 계수이고,  $k_2$ 는 절삭력의 접선, 법선 성분의 비를 나타낸다.

Fig. 1은 코너 가공시 미소 절삭날에 작용하는 절삭력과 공구 좌표계( $X'Y'$  Coordinate), 측정 절삭력 좌표계( $XY$  Coordinate)와의 관계를 나타내고 있다.  $F_x', F_y'$ 로 표현된 공구 좌표계에서의 절삭력은 공구의 치질을 예측하는 데에는 효율적이나 실제 실험에서 얻은 절삭력과는 비교가 불가능하다. 따라서 측정 절삭력 좌표계의 변환은 다음 식을 이용한다.

$$F_x = F_x' \cos \delta + F_y' \sin \delta \quad (4)$$

$$F_y = -F_x' \sin \delta + F_y' \cos \delta \quad (5)$$

### 2.2 코너 가공에서의 절삭력 예측 모델

Fig. 1은 일반적인 코너 가공의 모습을 나타내고 있다. 공구가 코너를 가공하게 되면 반경방향 절삭깊이(Rd)의 변화에 따라 절삭력이 증가한다.

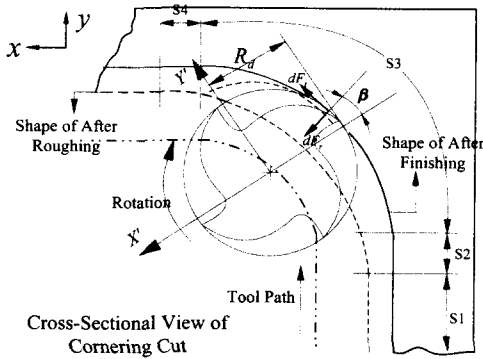


Fig. 1 Cutting geometry and coordinates system for cornering cut

코너에서의 절삭력을 효율적으로 예측하기 위해서는 공구이송에 따라 변하는  $R_d$ 를 계산해 줄 필요가 있다.

코너에서의  $R_d$ 를 계산하기 위하여 코너부 가공 진행거리  $S$ 는  $R_d$ 를 계산하기 위한 기하학적 조건으로부터 4구간으로 나뉜다. Fig. 1에서 실선은 정삭 가공 후의 형상, 점선은 황삭 가공 후 남아 있는 정삭여유분을 나타낸다. 그리고 2점 쇄선은 공구 경로이다. S1은 공구가 코너부에 진입하기 전으로  $R_d$ 가 일정한 경우이다. 코너 가공이 시작 되면 황삭 형상은 원호가 시작되지만 정삭 형상은 아직 코너부에 진입하지 않은 즉, 공구는 직선경로를 따라 움직이나  $R_d$ 는 증가하는 구간(구간 S2)이 시작된다. 이때의  $R_d$ 는 공구가 접촉하고 있는 정삭면과 공구와 황삭면과의 교점사이의 거리로 계산된다. S3는 황삭과 정삭 모두 코너부로서 공구 경로가 원호인 구간이다.  $R_d$ 는 공구와 황삭면과의 교점과 공구가 접촉하고 있는 정삭면에서의 접선과의 거리로 구할 수 있다. 마지막으로 S4는 공구가 X축에 평행한 직선경로를 움직이며 코너부를 빠져나가는 구간이다. 이때는 칩두께가 점차 감소하게 된다.

CAM 소프트웨어에서 생성된 NC 코드에서 공구 위치를 알 수 있으며, 본 알고리즘을 통하여 공구가 코너부의 어느 구간에서 절삭에 참여하고 있는지를 검사하여, 그 위치에서의 반경방향 절삭깊이를 구할 수 있다.

비절삭저항 계수  $k_1, k_2$  는 절삭 실험을 통하여 얻은 평균 절삭력으로부터 구할 수 있고, 평균 칩두께와의 관계로부터 지수식의 형태로 나타낼

수 있다. 이와 같은 방법으로  $k_1, k_2$  를 설정한 후 이미 개발된 절삭력 예측 시뮬레이션 프로그램<sup>(9)</sup>을 사용하여 코너부에서의 절삭력을 예측하였다.

### 2.3 표면 형상 예측 모델 수립

공구의 처짐을 예측하기 위하여 공구를 한쪽 끝단이 척에 고정된 외팔보로 가정한다. 공구는 공구에 작용하는 외력  $F_x, F_y$ 에 의하여 변형하게 되고, 이 때 공구에 작용하는 외력에 의한 처짐은 앞에서 비절삭저항을 이용한 절삭력 모델과 절삭력 중심을 이용하여 계산할 수 있다. 절삭력 중심은 절삭력 모델에 의해 예측되는 분포하중을 집중하중으로 단순화할 때 집중하중이 작용하는 위치이다.

$$CFY = \frac{\int F_y \cdot (L - z) dz}{\int F_y dz} \quad (6)$$

식에서  $F_y$ 는 절삭력의 Y성분,  $CFY$ 는  $F_y$ 의 절삭력 중심,  $L$ 은 유효 공구길이를 각각 나타낸다. 유효 공구길이  $L$ 은 스피들과 공작기계에서 발생하는 처짐량을 고려하기 위하여 도입되었으나 정삭의 경우나 공구의 직경이 상대적으로 작을 경우에는, 절삭력에 의한 스피들과 공작기계의 처짐이 비교적 크지 않다.

실제 절삭작업에서는 공구의 진동이나, 공작물의 변형, 구성인선의 발생, 절삭날 끝부분에서의 복잡한 소성변형의 영향, 열변형 등으로 인하여, 매우 복잡한 표면 생성기구가 존재한다. 그러나 이러한 복잡한 표면 생성기구를 모두 고려하여 절삭 표면을 시뮬레이션 한다는 것은 현실적으로 불가능하므로, 엔드밀의 절삭 작업에 의한 최종 절삭 표면의 예측을 위하여 다음과 같은 가정이 사용되었다. 절삭날의 운동과 공작물의 절삭에 대하여 공구형상과 공구의 처짐에 의한 기하학적인 관계만을 고려하여 절삭 표면에 가장 큰 영향을 미치는 공구의 처짐만을 고려, 절삭표면 형성 과정을 시뮬레이션한다.<sup>(10)</sup>

### 3. 코너 가공에서의 정밀도 향상을 위한 이송량 제어 모델

기존의 CAM 소프트웨어에서는 기하학적 형상 정보를 통해 가공경로를 생성하고 검증한다. 따라서 실제 절삭에서 발생하게 되는 Rd에 따른 절삭력의 변화, 공구의 처짐 등 다양하게 변하는 가공 역학을 고려하지 않고 가공 전구간에 동일한 이송량을 적용한다. 이는 최종 생성면의 가공 오차를 초래하는 원인이 되므로, 가공 정밀도를 향상시키기 위한 절삭조건 변경이 요구된다.

본 연구에서는 모든 가공 구간에서의 가공오차를 감소시키기 위하여 절삭 합력을 일정하게 유지시키도록 적정 이송량을 결정해주었다.<sup>(3)</sup>

$$Feed_{mod} = Feed_{init} \times \frac{Force_{init}}{Force_{est}} \quad (7)$$

$Feed_{mod}$ 는 적정 이송량이고,  $Feed_{init}$ 는 기준이 되는 이송량이다.  $Force_{init}$ 는 기준이 되는 초기 가공조건(Fig. 1에서 S1 구간)에서의 절삭 합력이고,  $Force_{est}$ (S2, S3, S4 구간)는 시뮬레이션 프로그램으로부터 계산된 절삭 합력이다.

## 4. 실험

### 4.1 절삭력 모델 검증 실험

#### 4.1.1 실험 방법 및 구성

코너부에서의 정삭 표면 정밀도는 그 전가공면(황삭)의 가공상태 및 형상과 많은 연관성을 갖는다. 본 연구에서는 황삭 가공면의 형상과 공구 경로와의 관계를 고려하여 세 가지 case에 대한 코너 가공에 관련된 실험을 수행하였다.

Fig. 2에서 점선은 황삭 후의 가공면이고, 실선은 정삭 후 가공면이다. 2점 쇄선은 정삭 가공을 위한 가공경로를 나타낸다. Case 1은 황삭, 정삭의 코너 반경보다 작은 반경의 공구로 가공하는 경우이다. 이 경우는 Rd가 0.1D~0.3D로 완만하게 증가한다. Case 2는 하나의 공구로 황, 정삭을 수행하는 경우로서 황삭, 정삭 코너반경과 공구반경이 모두 같다. 이때 공구는 직선경로를 따라 움직이며 코너에서 방향이 90° 바뀌게 된다. case

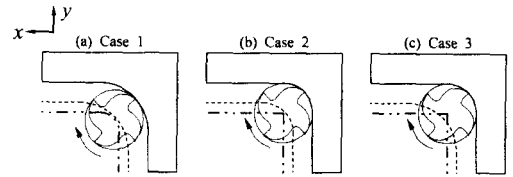


Fig. 2 Cases for experimental cornering cut

Table 1 Specification of the cutting conditions

tooth	Tool Radius	Rough Corner Radius	Finish Corner Radius	rpm	Feed/rot
Case 1	4	8	8	1800	0.12
Case 2	4	4	4	2000	0.12
Case 3	4	8	4	2000	0.12

3은 소재제거율을 고려하여 황삭가공은 큰 직경의 엔드밀로 수행하고 정삭은 정삭 코너 반경과 동일한 크기의 공구를 사용하여 가공하는 경우이다. 이 때는 Case 2보다 칩두께가 급격하게 증가한다. Fig. 2와 table 1에 수행한 실험 조건을 나타내었다.

실험에 사용된 머시닝센터는 현대 정공의 SPT-V18S이며, 공구 동력계는 Kistler 9257B type을 사용하였고, Kistler 5011 type의 Amplifier를 사용하였다. 피삭재는 Al6061-T6이다. 공구는 Helix Angle 50°의 carbide coated endmill 8φ를 사용하였다. 측면의 반경방향 절삭깊이는 0.8mm (0.1D)로 가공이 진행됨에 따라 변화하는 값이고, 축방향 절삭깊이는 15mm이다.

#### 4.1.2 절삭력 측정 실험 결과

세 가지 Case에 대한 절삭력 측정 결과는 Fig. 3에 있다. Fig. 3(a)의 결과를 보면, Case 1의 경우 반경방향 절삭깊이(Rd)의 증가(0.1D~0.3D)에 따라 절삭력 역시 완만하게 증가하였다가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. Case 2와 3의 절삭력 측정 실험결과는 Fig. 3(b),(c)와 같다. 이 두 경우는 공구의 이송방향이 직각으로 바뀌는 경우로서, 이송방향이 바뀌기 직전에 Rd가 큰 폭으로 증가한다(0.9D). 특히 Case 3은 정삭과 황삭의 코너반경 차이로 절삭력이 급격히 증가한다. Fig. 3에서 보면 공구의 이송방향이 바뀌는 부분에서 절삭력이 과도하게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이 부분에서는 소음과 함께 심한 채터가 발생하였다.

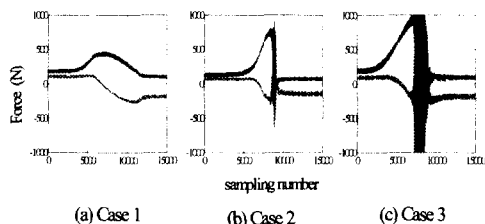


Fig. 3 Measurement of cutting forces in cornering cut

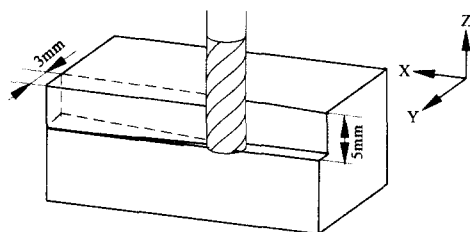


Fig. 4 Cutting conditions for specific cutting force

본 논문에서는 절삭력의 변화가 심하게 나타나는 Case 2,3의 경우는 제외하고, Case 1에 대한 절삭력 예측 및 표면예측 그리고 이송량 제어를 수행하였다.

4.1.3 비절삭 저항의 결정

코너에서의 절삭력을 예측하기 위해서는 변화하는 Rd에 적절한 비절삭저항  $k_1, k_2$ 를 결정해 주어야 한다.

Fig. 4는 비절삭저항을 결정하기 위한 실험장치이다. 그림과 같이 피삭재를 비스듬하게 변화하는 Rd와 같이 가공하고 코너 가공에 사용된 것과 같은 공구(6날, 초경)를 직선이송 시킨다. 이와 같은 절삭실험을 통하여 얻어진 절삭력을 이용하여 비절삭저항의 크기를 결정할 수 있다. 변화하는 반경방향 절삭깊이(Rd)에 대한 절삭력의 예측을 위하여, Rd의 몇몇 지점을 선정한다. 각각의 Rd에 대하여 임의의 비절삭저항  $k_1, k_2$ 를 선정하고 시뮬레이션 프로그램으로부터 절삭력을 예측한다. 실제 실험결과와 시뮬레이션 결과와의 비교를 통하여 적절한 비절삭저항을 시행착오법을 이용하여 결정해주었다. 이렇게 구한  $k_1, k_2$ 와 절삭조건에서의 평균칩두께( $t_m$ )을 이용하여 비절삭저항 예측곡선을 그렸다. 예측곡선은 Fig. 5와 같

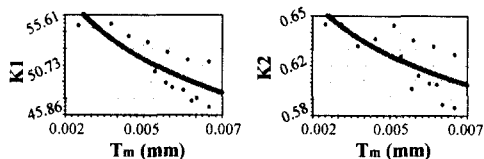


Fig. 5 Experimental result and prediction for the relation between average chip thickness and  $k_1, k_2$

으며 최소자승법을 이용하여 예측한 지수식은 다음과 같다.

$$k_1 = 22.57(t_c)^{-0.153} \tag{8}$$

$$k_2 = 0.41(t_c)^{-0.0775} \tag{9}$$

4.1.4 절삭력 예측 결과

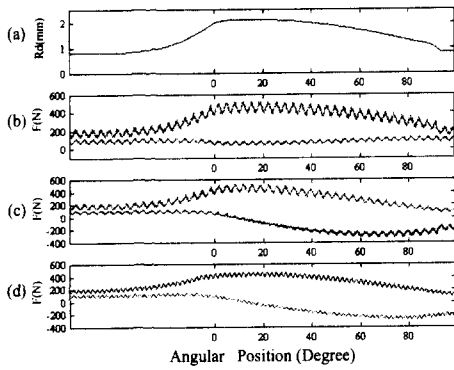
Fig. 6은 Case 1에 대한 6날(rpm1800, F216mm/min)에 대한 절삭력 예측 결과와 실험결과이다. Case 1은 공구경로가 곡선을 따라가는 경우이다. 최대 Rd는 0.1D~0.3D로 완만하게 증가했다가 감소한다(a). (b)와 (c)는 절삭력 시뮬레이션 프로그램을 통하여 절삭력을 예측한 결과이다. (b)는 X'-Y' 좌표계(공구 좌표계)에서의 절삭력으로, (a)의 최대 Rd인 부분에서 역시 최대 절삭력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 이 부분에서 처짐의 영향이 제일 클 것으로 예상된다. (c)는 X-Y 좌표계로 변환한 절삭력으로, 실제 공구 동력계를 통하여 얻게 되는 절삭력 측정결과(d)는 이와 같은 형태이다.

이상의 결과로부터 수립한 절삭력 예측 모델의 타당성 여부를 검증할 수 있다.

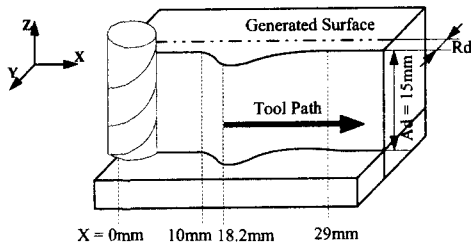
4.2 코너 가공 정밀도향상을 위한 실험

4.2.1 실험 방법

코너 가공에서는 공구의 이송방향이 바뀌게 되므로 실제 공구에 작용하는 절삭력과 공구 동력계로부터 측정된 절삭력은 일치하지 않는다. 따라서 측정된 절삭력 데이터를 시뮬레이션 결과와 비교, 분석하기 위해서는 공구 좌표계로의 변환이 필요하다. 좌표변환을 위해서는 측정 절삭력에 대응하는 실제 절삭했을 때의 공구 각위치를 알아야 하는데 이를 알아내는 것은 쉬운일이 아



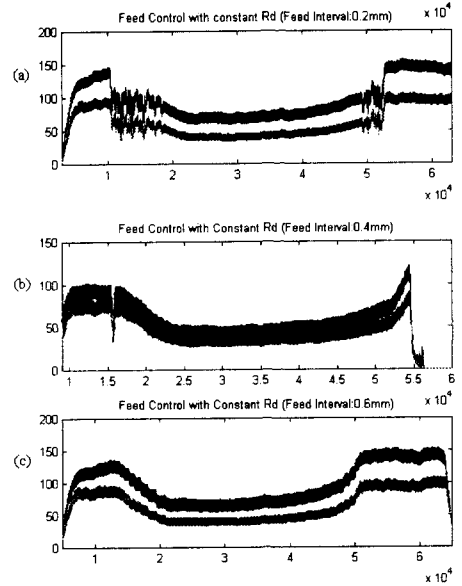
**Fig. 6** Comparison of cutting force between simulated and experimental results  
 (a) Radial depth in cornering cut  
 (b) Simulated cutting force in X'-Y' coordinates  
 (c) Simulated cutting force in X-Y coordinates  
 (d) Cutting force in experiment



**Fig. 7** Schematic illustration of modified cornering cut in linear direction

니다. 또한 코너 가공면을 측정하는 것 역시 측정 좌표계의 원점 설정, 기준면의 설정, 측정기의 강성 보장 등 많은 제약이 따릅니다. 따라서 본 연구에서는 절삭력에 대한 분석과 측정의 편이를 위해 다음과 같은 조건에서 실험하였다.

코너에서 급격하게 변화하는  $R_d$ 를 계산하여 Fig. 7과 같이 직선상에 펼쳐 코너 가공과 같은 가공 조건으로 만들어 주었다. 이렇게 하면, 정삭 가공은 X축 한 방향으로의 직선이송을 하는 것과 같고, 공구 동력계에서 측정된 절삭력 데이터는 공구 좌표계에서의 절삭력 데이터와 같다. 또한 가공면이 2차원 형태로 나타나기 때문에 레이저 측정기를 이용하여 쉽게 측정할 수 있다.

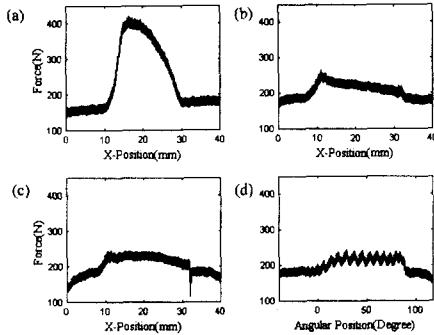


**Fig. 8** Characteristics of feed control performance in CNC machine ( $R_d = 0.8\text{mm}$ )  
 (a) Feed control interval = 0.2mm  
 (b) Feed control interval = 0.4mm  
 (c) Feed control interval = 0.6mm

#### 4.2.2 공작기계의 제어 특성

Feed 제어를 하기 위해서는 코너 가공시 원호 보간 코드(G02 혹은 G03)를 사용하지 않고 코너를 짧은 직선 구간으로 나누어서 각각의 구간에 대하여 Feed 제어를 수행하게 된다. 따라서 곡선인 코너 구간을 어느 정도의 간격으로 나누어야 하는가를 결정하는 것 역시 중요하게 고려되어야 하는 사항이다. 곡선을 짧은 직선구간으로 나누는 것이 곡선의 deviation을 작게 하겠지만, 너무 짧은 구간을 이송하면서 Feed를 변화시키는 경우, 제어가 제대로 수행되지 않는다.

Fig. 8은 이러한 이송량 제어 구간과 공작기계의 제어 특성 파악을 위해 수행한 실험 결과이다.  $R_d=0.8\text{mm}$ 로 일정하고, 이송량 제어 간격이 각각 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm인 경우에 대하여 Feed에 변화를 주어 실험하였다. Feed 변화량은 4.2.3절의 실험과 동일한 조건의 코너에서 이송 제어를 수행할 때 사용되는 Feed 제어코드를 사용하였다. 즉, 이송량 결정 프로그램으로부터 얻어진 결과를 사용하였다. Fig. 8(a)를 보면 두 부분에서 제



(Feed : mm/min)

Fig. 9 Resultant Cutting Force with various case

- (a) Linear cut with constant feed(F216)
- (b) Linear cut with modified feed
- (c) Linear cut with modified feed
- (d) Cornering cut with modified feed ((b),(c),(d) - F91~216)

어가 제대로 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 이 구간은 코너가공에서 공구가 코너를 진입하는 구간과 코너에서 빠져나가는 구간으로서 Feed의 변화폭이 큰 경우이다. 간격을 0.4mm로 한 경우(Fig. 8(b))는 대체로, 안정적인나 공구가 코너에 진입하는 구간에서 다소 불안정한 절삭력을 관찰할 수 있다. Fig. 8(c)는 이송량 제어 간격을 0.6mm로 한 경우로서 제대로 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이상의 실험 결과로부터 공작기계의 Feed 제어는 이송량 제어 간격과 Feed 변화폭에 의존적임을 알 수 있다. 즉, 같은 이송량 제어 간격이라 하더라도 Feed 변화폭이 크면 제대로 제어하지 못하지만, 그 폭이 작으면 제어할 수 있음을 알 수 있다.(Fig. 8(a))

이상의 결과로부터 본 실험에서 Feed 제어를 수행하기위한 코너 구간 간격은 0.6mm가 타당하다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2.3 실험 결과 및 분석

Fig. 9는 실험으로부터 측정된 절삭력의 합력을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 Fig. 7과 같은 형태의 피삭재를 일정한 feed(F216mm/min)로 가공한 결과이다. (b)는 이송량 결정 알고리즘으로부터 생성

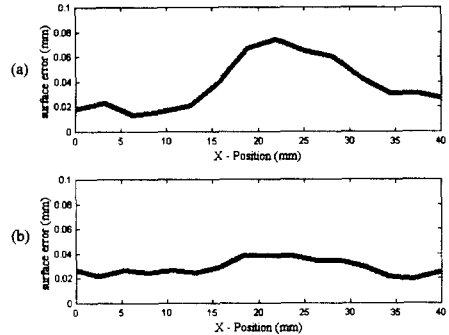


Fig. 10 Surface profile errors measured in feed direction by laser (Feed : mm/min)

- (a) Surface error with constant feed(F216)
- (b) Surface error with modified feed (F91~216)

된 적정 Feed(F91 ~ F216mm/min)를 이송량 변화간격 0.6mm에 대하여 적용, 가공한 절삭력 측정 결과이다. 이송량을 제어하기 전에 비하여 최대 합력은 50% 정도 감소되었음을 확인할 수 있다. (c)는 (b)와 동일한 조건으로 실험한 결과인데, 끝부분에서 chatter가 나타난다. 이 부분은 코너구간에서 직선구간으로 빠져나가는 구간으로서 좁은 구간에서 Rd의 변화폭이 크고, 또한 이송량의 변화역시 큰 부분이다. 절삭력의 이러한 거동은 Fig. 8(b)에서도 관찰할 수 있다. 따라서 이러한 결과는 Rd와 Feed 변화의 폭, 그리고 Feed를 변화시키는 구간간격과 관련있는, 머신의 제어특성이 민감하게 반응하는 구간에서 나타나는 결과라 생각된다. (d)는 실제 코너 가공에 적용했을때의 절삭력 합력의 결과이다. 이송량 변화간격은 0.5~0.6mm 이다. 코너 가공 구간에서 비교적 일정한 절삭 합력이 발생함을 확인할 수 있다. 절삭력 측정결과에서 요동을 관찰할 수 있는데, 이는 코너 구간을 0.5~0.6mm간격의 직선 구간으로 나누어 가공할때 공작기계 컨트롤러의 제어특성 때문인 것으로 생각된다. 즉, 코너 구간의 기하학적 형상을 직선구간으로 펼쳐서 가공하는 경우는 Rd변화에 따라 y축으로 이송하면서 Feed 제어가 이루어지는 반면 실제 코너에서는 x,y 두 축을 동시에 이송하면서 feed 제어를 변화시키게 되는데, 동시에 3가지의 제어를 하는데 따르는 기계적 제어 특성 때문에 얻어진 결과로 생각된다.

Fig. 10은 Fig. 9(a)와 (b)의 경우 가공면 가장 상단 부분을 X축 방향으로 laser를 이용하여 측정 한 결과이다. 동일한 이송량으로 가공한 경우는 반경방향 절삭깊이의 증가에 따라 치짐량도 증가 하고 있음을 볼 수 있다. 이송량을 제어한 경우는 전 구간에 걸쳐서 거의 공구의 치짐이 균일하 다는 결과가 얻어졌다.

역시 가공면을 Axial(Z축)방향으로 측정해보면, 동일 이송량으로 가공한 경우는 Rd의 증가에 따 라 공구 치짐의 영향이 크게 나타나지만, 이송량 을 제어해 준 경우는 전 구간에 걸쳐서 치짐의 영향이 매우 작은 동일한 결과를 보여준다.

Fig. 11과 12는 실험 4.2.3에 대한 표면 예측 시 물레이션 결과이다. Fig. 11로부터 일정한 이송량 으로 가공한 경우는 Rd의 증가에 따라 표면 오차 도 증가함을 관찰할 수 있으며, 이송량을 제어해

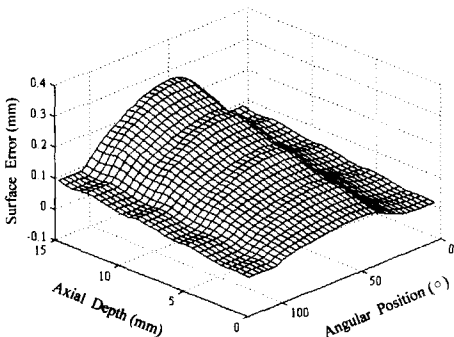


Fig. 11 Surface prediction in cornering cut with constant feed

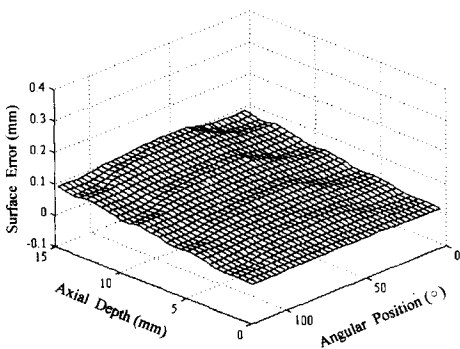


Fig. 12 Surface prediction in cornering cut with modified feed

준 경우는 코너 전 구간에 걸쳐서 공구 치짐의 영향이 매우 작은 표면이 생성됨을 Fig. 11로부터 예측할 수 있다. Fig. 10이 가공면의 상단면을 측정 한것임을 고려하여 Fig. 11과 12의 Axial Depth 가 0-5mm인 구간을 비교해보면 두 결과가 일치하 고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

- (1) 코너 가공시 절삭거동 예측을 위한 절삭력 예측 모델을 수립하였고, 그 타당성 여부를 실험 을 통하여 검증하였다.
- (2) 실험 결과로부터 코너 가공에서는 정삭 코 너 반경보다 작은 공구를 사용하여 이송량 제 어를 수행하면 보다 만족스러운 표면 정밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.
- (3) 코너 가공에서의 수평 합력을 일정하게 유지하도록 하는 적정 이송량을 결정하는 프로그램 을 개발하였다.
- (4) 코너가공시 발생하는 절삭력의 측정과 가공 면 측정의 어려움을 해결하기 위하여 코너가공에 서의 공구의 위치에 따른 기하학적 해석을 통한 절삭깊이를 해석적으로 표현하여 직선가공에서 동일한 가공조건으로 가공하였다.
- (5) 코너 가공에서 수평합력을 일정하게 유지하 도록 하는 적정 이송량을 결정하는 프로그램을 개발하였다.
- (6) 이송 제어를 통한 실제 가공면 정밀도 항상 의 효과를 관찰함으로써 가공면 예측 프로그램의 타당성을 검증하였다.

### 참고문헌

- (1) Yong Li, Iwabe, H. and Fujii Y., 1990, "Study on Improvement of Machining Accuracy in Cornering Cut with end mill," *JSME*, Vol. 56, pp. 284-289.
- (2) Tlustý J. and Elbestawi M., 1979, "Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills," *Annals of CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 253-255.
- (3) 오준호, 정충영, 1988, "밀링머신의 절삭력 제어를 통한 표면굴곡도 향상에 관한 연구," 대한 기계학회논문집 제12권 제2호, pp. 206-214.
- (4) 조현덕, 양민양, 1991, "볼 엔드밀 공구에 의



- 한 코너가공과 일정한 최대 수평합력을 위한 이송속도 결정," 대한기계학회논문집 제15권 제5호, pp. 1572~1586.
- (5) Tarng Y.S. and Shyur Y.Y., 1993, "Identification of Radial Depth of Cut in Numerical control Pocketing Routines," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 33, No.1, pp. 1~11.
- (6) 김찬봉, 양민양, 1995, "엔드밀링의 효과적인 절삭력 모델과 NC 검증시스템으로의 응용," 대한기계학회논문집 제19권 제7호, pp. 1555~1562.
- (7) Wang W.P., 1988, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three Dimensional End Milling," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 57~66.
- (8) Kline W.A., Devor R.E. and Lindberg J.R., 1986, "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.
- (9) 김용현, 이상규, 고성립, 1998, "엔드밀의 코너가공시 절삭 거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 '98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 178~181.
- (10) 이상규, 고성립, 1997, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회 '97년도 춘계학술대회논문집, pp. 788~793.