

<論 文>

엔드밀링의 효과적인 절삭력 모델과 NC 검증시스템으로의 응용

김찬봉* · 양민양**

(1994년 3월 18일 접수)

Fast Force Algorithm of End Milling Processes and Its Application to the NC Verification System

Chan-Bong Kim and Min-Yang Yang

Key Words: End Mill(엔드밀), Cutting Force(절삭력), NC(수치제어), Verification(검증), Cutting Condition(절삭조건)

Abstract

This study represents the non-dimensional cutting force model. With the non-dimensional cutting force model it is possible to estimate efficiently the maximum cutting force during one revolution of cutter. Using the non-dimensional cutting force model, the feed rate and spindle speed are adjusted so as to satisfy the maximum cutting force and maximum machining error. To verify the accuracy and efficiency of the non-dimensional cutting force model, a series of experiments were conducted, and experimental results proved and verified the non-dimensional cutting force model. The NC toolpath verification system developed in this paper uses the non-dimensional cutting force model, so that it is effective for calculating the cutting force and adjusting the cutting conditions.

기 호 설 명

<p>d_e : 절삭날에 작용하는 절삭깊이(mm)</p> <p>f_m : 공구 일회전에 대한 절삭날당 최대 이송량 (mm/tooth)</p> <p>FC : 절삭력</p> <p>nFX, nFY, nFZ : X-Y-Z 좌표계에서 무차원화된 절삭력</p> <p>Fnx, Fny, Fnz : X-Y-Z 좌표계에서 미소 절삭날에 대한 무차원화된 절삭력</p> <p>Keq : 공구의 스프링상수</p> <p>N_r : 공구날 수</p> <p>N_z : 공구축 방향으로의 미소 절삭날 수</p> <p>N_θ : 공구회전각도에 대한 분할수</p>	<p>v : 절삭속도</p> <p>α : 경사각</p> <p>α_n : 직각경사각(normal rake angle)</p> <p>β_n : 헬릭스각도(helix angle)</p> <p>δ : 공구의 처짐</p> <p>τ : 전단강도(Kgf/mm²)</p> <p>ϕ : 전단각(degree)</p> <p>Ψ : X-Y-Z 좌표계에서 Z축에 대한 공구회전각</p> <p>θ_i : 공구와 공작물간의 시작점에서의 접촉각</p> <p>θ_f : 공구와 공작물간의 끝점에서의 접촉각</p>
---	--

1. 서 론

엔드밀링은 금형, 항공기 부품의 가공 등 CNC 가공의 많은 부분을 차지하고 있다. 그러나 CNC

*한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 한국과학기술원, 기계공학과

공작기계와 CAD/CAM 기술의 지속적인 발전에도 불구하고 자유곡면이 포함된 복잡한 부품의 황삭 및 정삭가공에서 적절한 절삭조건을 설정하여 최적의 가공을 수행하는 것은 매우 어렵다. 이런 이유로 인하여 그동안 엔드밀링의 절삭기구 해석에 관하여 많은 연구들이 수행되어 왔다.

그러한 연구는 크게 평균 절삭력 모델과 미소 절삭력 모델로 분류할 수 있다. Wang⁽¹⁾은 공구의 이동에 의하여 제거되는 공작물의 단위시간당 절삭량(material removal rate)에 단위체적당 작용하는 비저항(specific cutting energy)을 곱하여 평균 절삭력을 구하였다. 반면, Kline 등⁽²⁾은 가공에 참여하는 절삭날을 미소요소로 나누고 각 미소 절삭날에 걸리는 절삭력을 합하여 총 절삭력을 계산하는 미소 절삭날 모델을 이용하였다. 이 모델은 공구의 형상오차(run-out),⁽³⁾ 공구의 처짐,^(4,5) 공구의 떨림⁽⁶⁻⁸⁾ 등을 고려한 연구의 기본이 되기도 하였다. 평균 절삭력 모델은 효율성면에서 장점이 있는 반면 정확성이 결여되는 단점을 가지며 미소 절삭날 모델은 그와 상반되는 성질을 가지고 있기 때문에, 지금까지 발표된 절삭력 계산 모델은 CAD/CAM 시스템의 중요한 기능으로 요구되는 절삭력 계산 및 절삭조건 설정 기능에 효과적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다.

NC 파트프로그램은 여러가지 이유로 인하여 기하학적인 오류와 물리적인 오류를 포함하게 되는데, 이러한 오류를 실 가공전에 검증시스템을 이용하여 제거하면 무인가공을 실현할 수 있어 생산성 향상에 많은 도움을 줄 수 있다.⁽¹⁰⁾ 현재 이용되고 있는 대부분의 공구제작 검증시스템은 기하학적인 문제만을 검증할 수 있기 때문에 작업자의 판단에 의하여 절삭조건이 부여되어 작업자의 능력에 따라 가공능률이 달라지고 전반적으로 보수적인 절삭조건을 부여함으로써 인하여 생산성이 떨어지는 것이 실정이다.

본 연구에서는 물리적인 오류를 검증하기 위하여 절삭력을 효과적으로 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였고, 이것을 이용하여 절삭조건을 검증할 수 있도록 하였다. 절삭력 계산을 효과적으로 수행하기 위하여 볼엔드밀링의 절삭력 계산에 이용하였던 볼엔드 밀의 미소 절삭날 모델을⁽⁹⁾ 이용하여 무차원화된 절삭력 선도를 구하였고, 이것을 이용하여 공구가 한 회전동안 작용하는 최대 절삭력 또는 최대 가공오차가 발생하는 공구회전각도와 그 값을

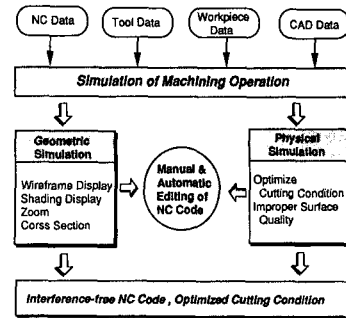


Fig. 1 Structure of the NC verification system

효과적으로 계산 할 수 있도록 하였다. 또한, 그 모델을 NC 공구제작의 검증시스템으로 발전시켜 그 정확성 및 효율성을 입증하였다. 본 연구에서 제시한 NC 공구제작의 절삭조건 검증시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 검증시스템에서는 주어진 NC 파트프로그램으로 가공할 경우 발생하는 절삭력을 효과적으로 예측하여 허용 절삭력 또는 가공오차 이내로 가공할 수 있도록 이송속도(feed)를 조절하여 최적의 가공을 할 수 있도록 하였다.

2. 효과적인 절삭력 모델

기존에 제시된 엔드밀링의 절삭력 계산과정⁽²⁾은 절삭에 참여하는 모든 절삭날을 미소요소로 나누고, 각각의 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 구한 후 합해야 하므로 다음과 같은 많은 계산과정을 거치게 된다.

$$FC = \sum_{i=1}^{N_0} \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_z} \{C_1 \Phi(i, j, k) + C_2 \Phi(i, j, k)\} \quad (1)$$

여기서,

$C_1 C_2$: 상수

N_0 : 공구날 수

N_f : 공구축 방향으로의 미소 절삭날 수

N_z : 공구 회전각도에 대한 분할수

$\Phi(i, j, k)$: 미소절삭날의 각도

또한, 볼엔드밀링의 절삭력 계산을 위해 제안된 모델⁽⁹⁾도 절삭날을 미소요소로 나누어 각 미소 절삭날에 작용되는 절삭력을 2차원 절삭실험을 통하여 얻은 관계수식으로부터 계산한 후 합하는 과정을 거치므로 다음과 같이 많은 계산을 해야한다.

$$FC = \sum_{i=1}^{N_0} \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_z} \{CF(\nu, f, a) \Phi(i, j, k)\} \quad (2)$$

Table 1 Constants for curve fitting of non-dimensional cutting forces

		$F_{nx}=a+b\theta+c\theta^2+d\theta^3+e\theta^4+f\theta^5$ $F_{ny}=a+b\theta+c\theta^2+d\theta^3+e\theta^4+f\theta^5$ $F_{nz}=a \sin \theta$					
		a	b	c	d	e	f
Fnx	(a)	3.805e-2	-1.468e-3	7.327e-4	-1.039e-5	4.680e-8	-6.344e-11
	(b)	3.679e-2	-7.847e-4	7.057e-4	-1.000e-5	4.439e-8	-5.809e-11
	(c)	3.862e-2	-1.752e-3	7.435e-4	-1.055e-5	4.722e-8	-6.536e-11
	(d)	3.852e-2	-1.749e-3	7.428e-4	-1.053e-5	4.762e-8	-6.513e-11
	AVG	3.795e-2	-1.315e-3	7.279e-4	-1.034e-5	4.647e-8	-6.266e-11
Fny	(a)	5.889e-3	1.752e-2	-1.029e-4	-5.284e-6	5.387e-8	-1.354e-10
	(b)	7.397e-3	1.733e-2	-9.810e-5	-5.306e-6	5.370e-8	-1.344e-10
	(c)	5.439e-3	1.756e-2	-1.032e-4	-5.299e-6	5.407e-8	-1.360e-10
	(d)	5.884e-3	1.749e-2	-1.003e-4	-5.339e-6	5.430e-8	-1.365e-10
	AVG	6.344e-3	1.746e-2	-1.022e-4	-5.287e-6	5.386e-8	-1.253e-10
Fnz	(a)	0.142					
	(b)	0.141					
	(c)	0.143					
	(d)	0.141					
	AVG	0.141					

여기서,

- C : 상수
- ν : 절삭속도
- f : 이송속도

α : 위면정사각

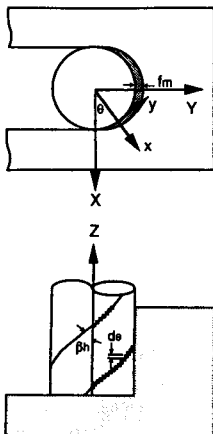
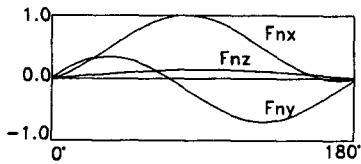
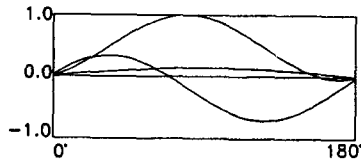


Fig. 2 End milling cut geometry

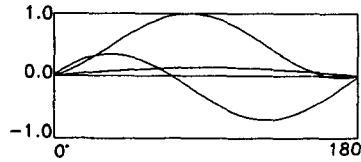
본 연구에서는 이러한 계산의 복잡성을 줄여 효과적으로 계산할 수 있도록 무차원화된 절삭력함수를 이용하였다. 고속도 공구강으로 SM45C 강을 가공할 때 Fig. 2와 같이 엔드밀의 절삭날을 높이 방향으로 1 mm씩 나누어 미소 절삭날을 만든다. 이 미소 절삭날 한개가 0°에서 180°까지 회전하면서 가공할 경우 절삭속도(cutting speed), 이송속도(feed rate), 공구의 위면 경사각(normal rake angle) 및 절삭날의 비틀림각(helix angle)의 변화에 따라 절대적인 절삭력의 크기는 다르나 최대 절삭력을 1로 하여 무차원화하면 Fig. 3과 같이 매우 비슷한 절삭력 선도를 얻을 수 있다. 이렇게 무차원화된 절삭력 선도를 x 와 y 방향은 5차 다항식으로 z 축 방향으로서는 사인(sine)함수로 보간하면 Table 1과 같이 된다. 공구의 형태와 절삭조건을 달리해도 Fig. 3에서 보인 바와 같이 절삭력 선도의 형태가



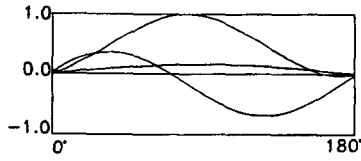
(a) Radius:5mm, Feed rate:0.1mm/rev, RPM:300, Normal rake angle:15°, Heilx angle:30°



(b) Radius:10mm, Feed rate:0.3mm/rev, RPM:300, Normal rake angle:15°, Heilx angle:30°



(c) Radius:10mm, Feed rate:0.1mm/rev, RPM:300, Normal rake angle:17°, Heilx angle:30°



(d) Radius:10mm, Feed rate:0.1mm/rev, RPM:300, Normal rake angle:13°, Heilx angle:33°

Fig. 3 Non-dimensional cutting forces with varying cut geometries and cutting parameters

같은 뿐만 아니라 Table I에서 보인 바와 같이 보 간한 곡선식의 계수가 거의 일치하기 때문에 평균 적인 하나의 곡선식으로 나타낼 수 있다. 이러한 현상으로 인하여 13가지 경우의 절삭조건 및 공구 의 형태에 대하여 무차원 절삭력 선도를 구한 후 평균을 취하여 다음과 같이 평균적인 무차원 절삭 력함수를 구하였다. (Fig. 4)

$$F_{nx} = 3.795E-2 - 1.315E-3\theta + 7.279E-4\theta^2 - 1.034E-5\theta^3 + 4.647E-8\theta^4 - 6.266E-11\theta^5 \quad (3)$$

$$F_{ny} = 6.344E-3 + 1.746E-2\theta - 1.022E-4\theta^2 - 5.287E-6\theta^3 + 5.386E-8\theta^4 - 1.253E-10\theta^5 \quad (4)$$

$$F_{nz} = 0.141\sin\theta \quad (5)$$

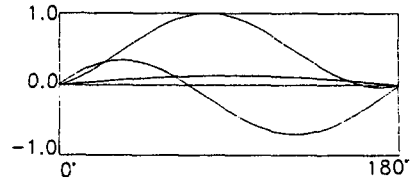
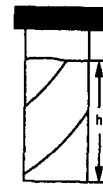
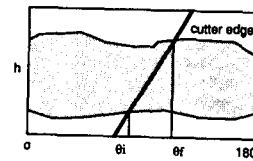


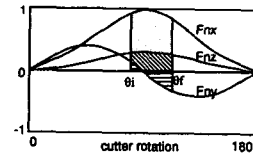
Fig. 4 Non-dimensional cutting forces for disk element of end-mill



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Contact area and non-dimentional cutting force of end-mill

무차원화된 절삭력함수로부터 공구날 한개가 1 회 전하는 동안 절삭날이 Fig. 5(b)와 같이 공작물과 접촉했을 경우 상대적인 절삭력은 Fig. 5(c)와 같 이 빗금친 부분이 된다.

$$nFX = \int_{\theta_i}^{\theta_f} F_{nx} d\theta \quad (6)$$

$$nFY = \int_{\theta_i}^{\theta_f} F_{ny} d\theta \quad (7)$$

$$nFZ = \int_{\theta_i}^{\theta_f} F_{nz} d\theta \quad (8)$$

무차원화된 절삭력함수를 이용하면 공구가 1회전 할 때 작용하는 절삭력의 상대적인 크기를 빠른 시 간에 계산할 수 있고, 1회전 하는동안 상대적인 절 삭력이 최대가 되는 회전각도에서 절대적인 절삭력 이 최대로 작용하게 된다. 즉, 상대적인 절삭력의

크기로부터 최대 절삭력이 어느 회전각도에서 발생하는지 쉽게 계산할 수 있게 된다. 식(6)~식(8)의 값은 공구날 한개가 임의의 순간에 공작물과 접촉한 상태에서 작용하는 절삭력의 상대적인 크기를 나타낸다. 상대적인 크기로부터 한 방향의 절삭력 또는 총 절삭력의 합력이 최대가 되는 공구의 회전각도를 구할 수 있고, 그때의 절대적인 절삭력은 기존의 절삭력 모델을⁽⁹⁾ 이용하여 구할 수 있게 된다. 무차원 절삭력함수를 이용하여 상대적인 절삭력을 구하는 과정은 기존의 방법인 식(1)과 식(2)에 비하여 다음과 같이 매우 간단히 나타낼 수 있다.

$$FC = \sum_{j=1}^{N_0} \sum_{k=1}^{N_z} [nFX, nFY, nFZ] \quad (9)$$

미소 절삭날 모델에 의하여 절삭력을 계산할 경우 절삭에 참여하는 절삭날을 미소요소로 나누고 각 미소 절삭날에 식(1) 또는 식(2)에서 보인 계산 과정을 적용하여야 하므로 많은 계산을 수행해야 한다. 그러나 본 연구에서 제시한 무차원화된 절삭력 모델을 이용할 경우 식(6), (7), (8) 등으로 계산할 수 있기 때문에 계산이 훨씬 간단하다. 예를 들어 엔드밀이 길이방향으로 10 mm만큼 가공에 참여하고 있고 절삭날을 1 mm씩 미소 절삭날로 만들어 계산한다고 할 때 미소 절삭날 모델은 임의의 공구 회전각도에 대하여 식(1) 또는 식(2)를 10개의 미소 절삭날에 적용하여 합산하지만 무차원 절삭력 모델은 식(6), (7), (8)을 이용하여 한번만 계산하면 상대적인 절삭력의 크기를 알 수 있게 된다. 즉, 공구가 1회전하는 동안 n_0 각도마다 계산을 하고 미소 절삭날의 개수가 n_z 개 일때, 미소 절삭날 모델은 $O(n_0 n_z)$ 의 계산이 필요한 반면 무차원 절삭력 모델은 $O(n_0)$ 에 가까운 계산만이 필요하게 된다.

3. 이송속도의 조정

엔드밀링에서 발생하는 대부분의 문제들은 가공 상황에 따라 이송속도(feed)와 절삭속도(cutting speed) 등을 적절히 조절하지 못하여 절삭력이 과대하게 작용하기 때문에 발생한다. 즉, 코너가공과 같이 갑자기 가공이 많이 되는 부분에서는 절삭력의 변동으로 인하여 공구의 떨림, 마모, 파괴 등이 일어날 수 있고, 공구의 힘으로 인하여 가공오차를

남기게 된다. 이러한 이유에서 최대 절삭력 또는 최대 가공오차 이내로 가공할 수 있도록 절삭조건을 조절해 주는 것은 정밀성 및 생산성 향상을 위하여 매우 중요하다.

절삭상수는 절삭깊이, 이송속도, 절삭속도 등 여러가지가 있으나 3차원 자유곡면의 엔드밀링에서 이송속도는 절삭력에 매우 밀접한 관계를 갖는 인자이므로 이것의 변화만으로도 충분한 효과를 얻을 수 있다.

이송속도의 변화를 통하여 얻고자 하는 효과를 크게 두가지 관점에서 생각 할 수 있다. 첫째는 총 절삭력의 합력이 설정한 최대값 이상 넘지 못하도록 이송속도를 조절하는 것이고, 두번째는 공구의 힘을 고려하여 가공오차가 최대값 이하로 발생되도록 이송속도를 조절하는 것이다. 이러한 경우 공구의 상당 스프링상수를 계산 또는 실험에 의하여 구해야 한다.

총 절삭력의 합력이 설정한 최대값 이상 넘지 못하도록 이송속도를 조절하기 위해서는 먼저 무차원 절삭력 함수를 이용하여 공구 1회전중 최대 절삭력이 발생하는 각도를 구하고 그 각도에서 식(2)를 이용하여 절대적인 총 절삭력을 구한다. 이 때의 총 절삭력이 설정한 최대 절삭력보다 큰 값이면 이송속도를 조절해 주어야 하는데 절삭력과 이송속도의 관계는 비선형적인 관계이기 때문에 bisection방법을 이용하여 구하였다.

$$F_{total} = f(feed) \quad (10)$$

가공오차가 최대값 이하로 발생되도록 이송속도를 조절하기 위해서는 가공후 남는 면방향으로 발생하는 절삭력이 최대가 되는 각도를 구하고 그 방향으로의 절삭력과 공구의 상당 스프링상수를 이용하여 공구의 힘을 구한다. 공구의 힘과 이송속도의 관계도 비선형관계이기 때문에 bisection방법을 이용하여 구하였다.

$$\delta = \frac{F_{total}}{K_{eq}} \quad (11)$$

4. NC 검증시스템의 개발 및 적용

본 연구에서 제시된 절삭력 모델을 이용하여 물리적 오류를 검증할 수 있는 검증시스템을 개발하였다. Fig. 6에서 보인 바와 같이 공작물을 Z-map 형태로 표현한 후 공구와 공작물의 접촉상태를 구

하였다. 공구와 공작물의 접촉상태를 이용하여 접촉각을 구하고 공구가 1회전 동안 발생하는 최대 절삭력을 효과적으로 구하고 총 절삭력 또는 가공오차가 원하는 값 이내가 되도록 이송속도를 조절하였다.

본 연구를 통하여 제안된 알고리즘과 NC 검증시스템의 정확성을 검증하기 위하여 다음과 같이 기본 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 실험은 자유곡면이 포함된 금형이나 항공기 부품 등의 엔드밀링 작업조건과 상황이 비슷하도록 반경방향 절입깊이(radial depth)와 축방향 절입깊이(axial depth)가 함께 변하는 모양을 선정하였고 상향절삭을 하였다(Fig. 7). 사용한 공구는 고속도 공구강재질(HSS)의 2날 엔드밀을 이용하였으며 지름은 10 mm이고 날간의 형상오차(run-out)는 0.005 mm로 측정되었고 절삭실험은 절삭속도가 9.42 m/min으로 일정하게 부여된 상태에서 세가지 방법으로 수행하였다. 절삭력의 측정은 Kistler사의 공구동력계를 이용하여 공구 1회전당 330개의 데이터를 측정하여 1 mm간격당 최대값을 도출하였고 시뮬레이션 역시 1 mm간격당 최대값을 도출하였다.

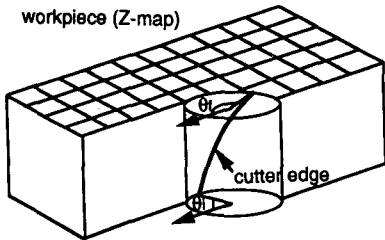
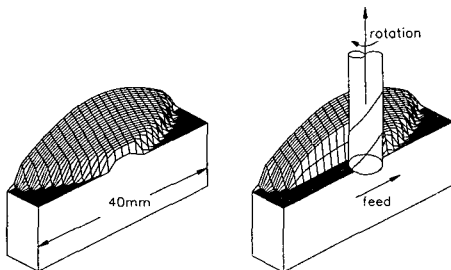


Fig. 6 Contact angle between workpiece and tool



Workpiece : SM45C
 Tool : End Mill(HSS, 2 flutes, $\phi 10$)
 helix angle : 30°
 normal rake angle : 15°
 spring constant : 97.5Kgf/mm

Fig. 7 Workpiece and tool for experiment

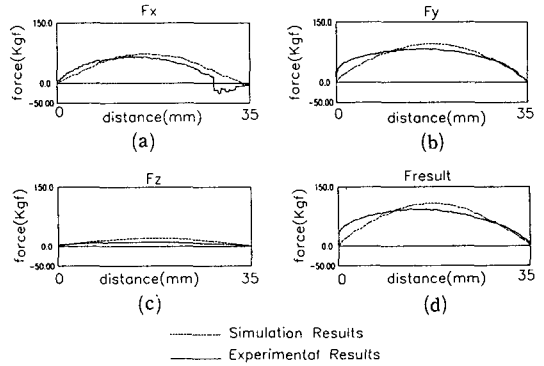


Fig. 8 Cutting forces for simulation and experiment

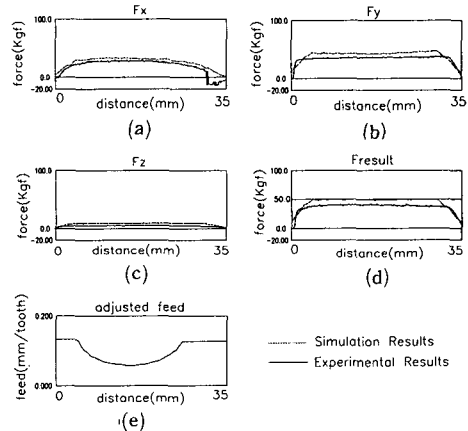


Fig. 9 Cutting forces for simulation and experiment with maximum force control

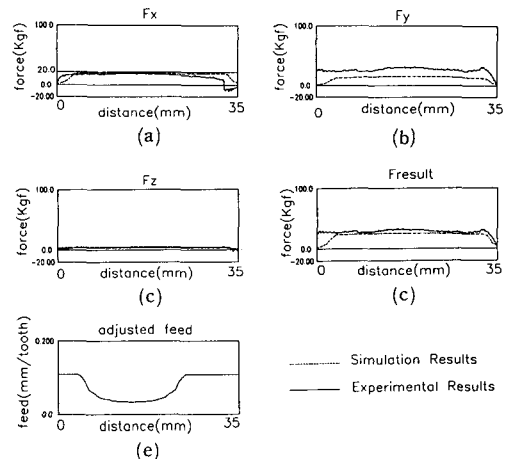


Fig. 10 Cutting forces for simulation and experiment with maximum FX control

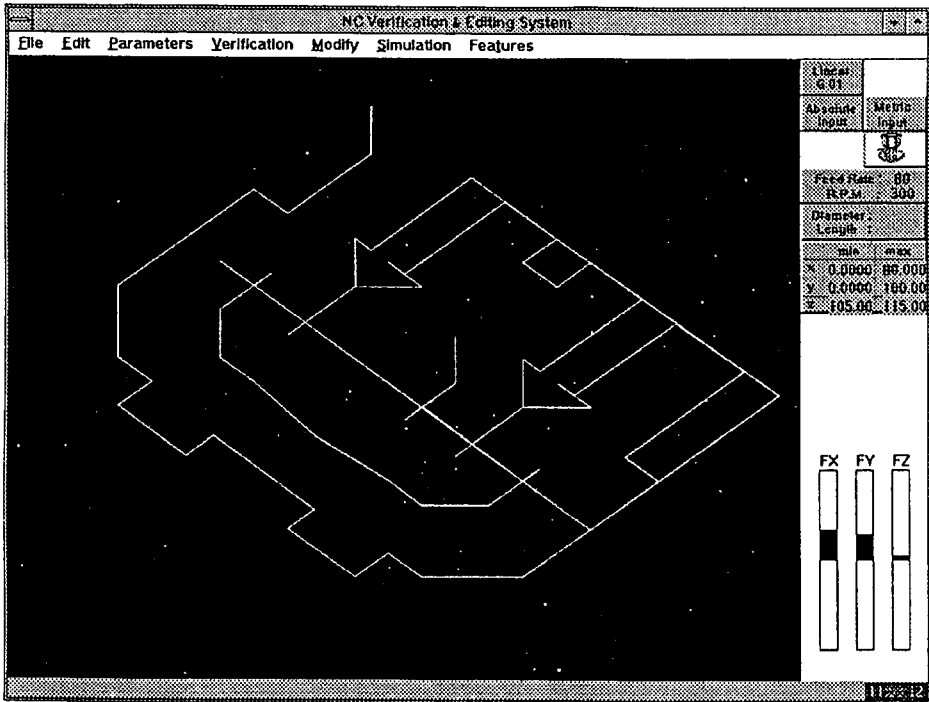


Fig. 11 Verification system

Fig. 8은 이송속도를 0.13 mm/tooth로 일정하게 부여하여 가공한 실험이다. 각축의 절삭력과 총 절삭력의 크기와 양상이 실험한 결과와 본 연구에서 제시된 알고리즘을 통하여 얻은 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 9는 총 절삭력을 50 Kgf이내로 작용하도록 이송속도를 조절한 실험으로 Fig. 9 (e)와 같이 이송속도를 조절할 수 있었고 그때의 총 절삭력은 예측된 결과보다 다소 작으나 50 Kgf를 넘지 않는 값으로 나타남을 볼 수 있다. Fig. 10은 공구의 진행방향과 직각이 되는 X축 방향으로 공구의 휨을 일정하게 유지하기 위하여 X축 방

향의 절삭력을 최대 20 Kgf이내로 가공하도록 이송속도를 조절한 실험이다. Fig. 10(a)와 같이 실험 결과와 예측된 값이 20 Kgf이내에서 발생했으며 그 크기도 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 11은 IBM PC상에서 MS-Windows 환경하에서 작동되도록 개발된 NC 코드의 물리적인 오류 검증시스템을 보여주고 있으며 공구궤적과 그때의 최대 절삭력을 도시하고 있다. Fig. 12는 본 시스템을 통하여 검증이 된 NC 코드를 이용하여 가공된 공작물의 모습이다.

6. 결 론

본 연구에서는 볼엔드밀의 절삭력 계산을 위해 제안된 절삭력 모델을 이용하여 엔드밀링의 절삭력을 효과적으로 구하는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 알고리즘은 공구날을 미소요소로 나누어 계산하였기 때문에 많은 계산량이 필요하며 시스템화 하는데 많은 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 제시한 알고리즘은 정확성은 기존의 모델과 유사하면서 계산은 한층 줄임으로 인하여 시스템화 하는데 기여할 수 있었다.

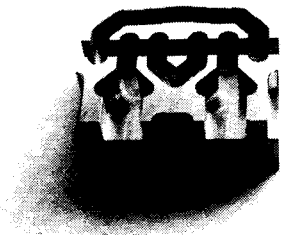


Fig. 12 Machined part

이러한 절삭력 모델은 절삭실험을 통하여 나타난 것처럼 가공상황이 변하는 경우라도 계산된 값과 실험값이 잘 일치함을 볼 수 있었으며, 최대 절삭력 또는 가공오차 관점에서 이송속도를 조절할 수 있어 적절한 가공조건을 부여할 수 있었다. 이러한 정밀성과 효율성으로 인하여 NC 공구체적의 물리적 검증시스템으로 발전이 가능하였고, NC 지원 CAM 시스템이나 CAD/CAM 시스템에서 절삭력을 계산하는데 매우 유용할 것이다.

참고문헌

- (1) Wang, W. P., 1988, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three Dimensional End Milling," *J. of Mfg. Sys.*, Vol. 7, No. 1, pp. 57~66.
- (2) Kline, W. A., DeVor, 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) Kline, W. A. and DeVor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *Int. J. of MTDR*, Vol. 23, 1983, pp. 123~140.
- (4) Kline, W. A., DeVor, R. E. and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME, J. of Eng. for Ind.*, Aug., Vol. 104, pp. 272~278.
- (5) Sutherland, T. W. and DeVor, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling System," *ASME, J. Eng. for Ind.*, Vol. 108, Nov. pp. 269~279.
- (6) Montgomery, D. and Altintas, Y., 1991, "Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling," *Trans. of ASME, J. of Eng. for Ind.*, May, Vol. 113, pp. 160~168.
- (7) Ismail, F. and Vadari, V. R., 1990, "Machining Chatter of End Mills with Unequal Modes," *Trans. of ASME, J. of Eng. for Ind.*, Aug., Vol. 112, pp. 229~231.
- (8) Tlusty, J. and Ismail, F., 1983, "Special Aspects of Chatter in Milling," *ASME, J. Vibration, Acoustics and Reliability in Design*, Jan., Vol. 105, pp. 24~32.
- (9) 박희덕, 양민양, 1989, "볼엔드밀에 의한 곡면 가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제3호, pp. 433~442.
- (10) 김찬봉, 박세형, 양민양, 1993, "NC 파트프 프로그램의 검증 및 오류수정에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1074~1083.