

## 볼엔드 밀링의 절삭조건 검증시스템

김 찬 봉\*, 양 민 양\*\*

### Verification System for Cutting Condition of Ball-End Milling Process

Chan Bong Kim\* and Min Yang Yang\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, the fast force algorithm has been studied so that it is used to calculate cutting forces and to develop the NC verification system. The NC verification using the fast force algorithm can verify excessive cutting force which is the cause of deflection and breakage of tool, and adjust the feed rate and spindle speed.

**Key Words** : ball-end mill(볼엔드밀), cutting force(절삭력), NC(수치제어), Verification(검증), cutting condition(절삭조건)

#### 기호 설명

$F_X, F_Y, F_Z$  : X-Y-Z 좌표계에서의 절삭력

$nF_X, nF_Y, nF_Z$  : X-Y-Z 좌표계에서의 무차원화된 절삭력

$F_{nx}, F_{ny}, F_{nz}$  : X-Y-Z 좌표계에서 미소절삭날에 대한 무차원화된 절삭력

$F_{nx\theta}, F_{ny\theta}, F_{nz\theta}$  :  $\theta$ 에 따른 무차원 절삭력 함수

$F_{nx\psi}, F_{ny\psi}, F_{nz\psi}$  :  $\psi$ 에 따른 무차원 절삭력 함수

$N_f$  : 공구날 수

$N_\psi$  : 공구축 방향으로의 미소 절삭날 수

$N_\theta$  : 공구회전각도에 대한 분할수

$v$  : 절삭속도

$\alpha$  : 경사각

$\alpha_e$  : 유효 경사각(effective rake angle)

$\alpha_n$  : 직각경사각(normal rake angle)

$\beta$  : 경사면에서의 마찰각

$\beta_h$  : 헬릭스 각도(helix angle)

$\Delta A_c$  : 미소절삭날에서 고려한 칩 단면적

$\Delta F$  : 미소절삭날에 작용하는 절삭력의 합력

$\Delta F_a, \Delta F_b, \Delta F_c$  :  $\Delta F$ 의 a-b-c좌표계에 대한 분력

$\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta F_z$  :  $\Delta F$ 의 X-Y-Z좌표계에 대한 분력

$\tau$  : 전단강도(Kgf/mm<sup>2</sup>)

$\phi$  : 전단각(degree)

$\psi$  : X-Y-Z 좌표계에서 Z축에 대한 공구 회전각

$\gamma$  : 미소절삭날과 절삭 속도 벡터로서 이루어지는 평면과 V-Vc 평면 사이의 각

\* 한국과학기술원 정밀공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 정밀공학과, 정회원

### 1. 서 론

볼 엔드 밀링은 자유 곡면의 가공에 많이 사용되고 있는 공정으로 그 사용이 더욱 확대되고 있다. 그러나 볼 엔드 밀링 작업의 절삭 조건은 볼 엔드 밀링 역학의 복잡성으로 인하여 경험적으로 부여되는 것이 대부분이기 때문에 적절한 가공이 이루어 지지 않고 있다. 특히 공구의 형상이 불과 같기 때문에 공구의 강성이 떨어지고 정점부위에서는 가공이 일어나지 않으며, 가공면에 커스프(cusp)가 발생하여 마무리 다듬질을 필요로 하고 자유 곡면을 가공할 경우 절삭력의 변동으로 인하여 공구가 손상되기 쉽기 때문에 적절한 가공조건을 부여하는 일이 매우 어렵다. (Fig. 1) 이러한 문제점을 해결하기 위하여 볼 엔드 밀의 형상을 개선하고자 하는 노력과<sup>1,2,3,4)</sup> 볼 엔드 밀링의 절삭기구 해석을 이용하여 적절한 절삭 조건을 부여하고자 하는 노력이 병행되어 왔다.<sup>5,6,7)</sup> 특히, 볼 엔드 밀링의 절삭력 해석에 관한 연구는 엔드 밀링에 비하여 많이 이루어 지지지는 않았지만, 최근에 볼 엔드 밀의 기하학적 관계와 2차원 절삭실험

으로부터 볼 엔드 밀링의 절삭력 예측에 관한 연구<sup>8)</sup>와 공구의 유연성 및 공구의 휨등에 의한 절삭력의 변화를 고려하여 허용 가공오차 이내로 가공할 수 있는 이송 속도 결정법에 관한 연구<sup>9,10)</sup>등이 수행되어 왔다.

그러나 볼 엔드 밀링의 절삭력 모델은 절삭날을 미소 요소로 나누고 각 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 합하여 총 절삭력을 구하는 방법을 이용하기 때문에 절삭력을 구하기 위해서 많은 계산 과정이 필요하게 되고 이러한 이유로 인하여 NC 검증시스템이나 CAM 시스템에 효과적으로 이용되지 못하고 있다.

NC 파트프로그램은 여러가지 이유로 인하여 많은 문제를 포함하고 있는 것이 실정이다. (Fig. 2) 이러한 오류를 검증하기 위하여 본 연구에서는 공구의 1회전 동안에 발생하는 절삭력의 최대값을 빠른 시간에 구할 수 있는 모델을 이용하여 NC 검증시스템을 개발하였다. NC 파트프로그램이 주어졌을 때, 그 공구 궤적으로 가공할 경우 발생하는 기하학적 오류와 최대 절삭력으로 인하여 발생하는 물리적인 오류를 검증하여 적절한 이송 속도와 절삭 속도를 부여할 수 있는 NC 검증시스템

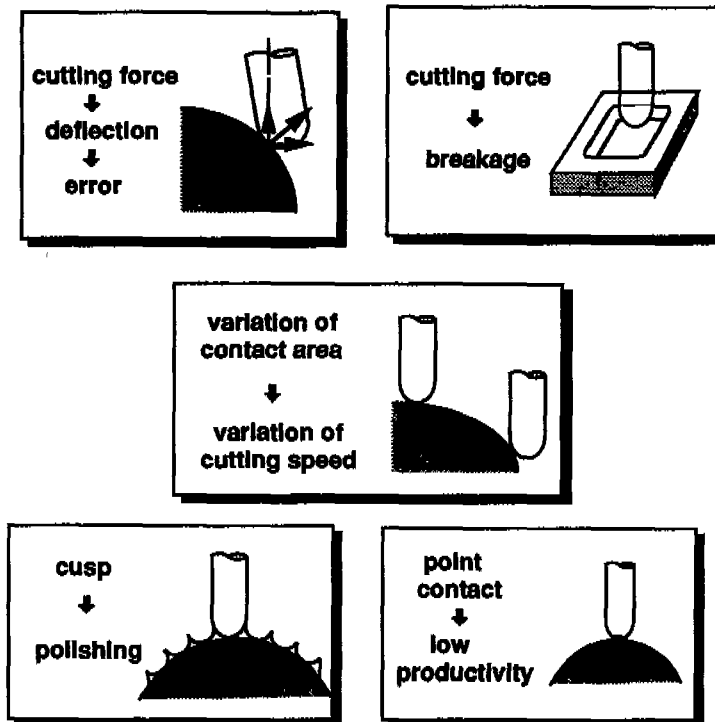


Fig. 1 Characteristics of Ball-End Milling

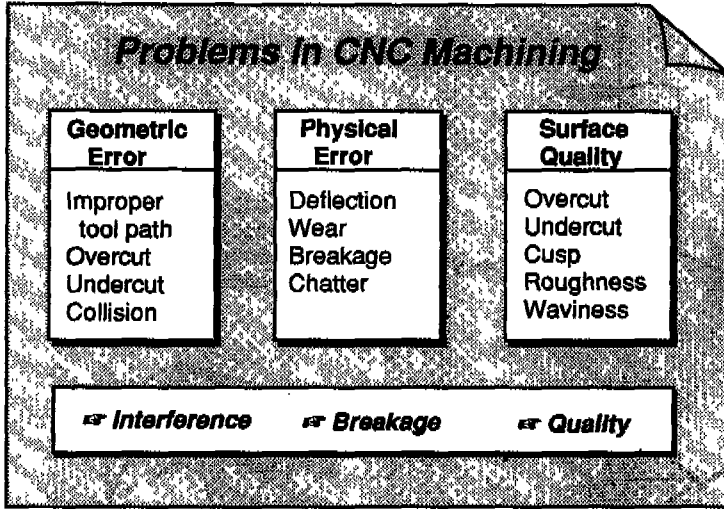


Fig. 2 Problems of CNC Machining

을 개발하였다.

## 2. 무차원 절삭력 모델

볼 엔드 밀의 형상은 구 부분에 있는 절삭날의 형태에 따라 평면 경사면 볼 엔드 밀과 곡면 볼 엔드 밀로 나눌 수 있다. 현재 제작상의 장점으로 인하여 평면 볼 엔드 밀이 많이 사용되고 있으며 이에 대한 절삭기구 해석을 위하여 평면 볼 엔드 밀의 절삭날을 미소 요소로 나누고 각각의 미소 절삭날에 작용하는 절삭력의 총합을 구하는 방법이 제시되었다.<sup>[8]</sup>

미소 절삭날에 작용하는 절삭력  $\Delta F_r$ 는 2차원 절삭 이론에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_r = \frac{\tau_s \Delta A_c}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha_e)} \quad (1)$$

이 식에서 칩단면적  $\Delta A_c$ 는 평면 경사면 볼 엔드 밀을 미소 요소로 나누어 기하학적인 관계로 부터 얻을 수 있고, 전단각( $\phi$ ), 전단각도( $\tau_s$ ), 마찰각( $\beta$ )은 2차원 절삭 실험을 통하여 절삭 속도( $v$ )와 이송량( $f$ )의 곱과 경사각( $\alpha$ )의 함수로 나타낼 수 있다. 이것을 Fig. 3에 나타낸 미소 절삭날 OA에 대하여 구하고 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 각각의 좌표계로 회전 변환하면 하나의 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 구할 수 있게 된다. 즉, V-Vc 평면상에서 미소 절삭날에 작용하는

절삭력은 다음과 같다.

$$\Delta F_a = \Delta F_r \sin(\beta - \alpha_e) \cos \gamma \quad (2)$$

$$\Delta F_b = \Delta F_r \cos(\beta - \alpha_e) \quad (3)$$

$$\Delta F_c = \Delta F_r \sin(\beta - \alpha_e) \sin \gamma \quad (4)$$

이 값을 공구날 좌표계 및 고정 좌표계 X-Y-Z에 대하여 회전 변환하면 고정 좌표계에서 미소 절삭날에 대한 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \\ \Delta F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \xi & 0 & -\sin \xi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \xi & 0 & \cos \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_a \\ \Delta F_b \\ \Delta F_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

이러한 과정을 통하여 절삭에 참여하는 총 미소날에 대하여 절삭력을 구하기 위해서는 공구가 1회전하는 동안 다음과 같이 많은 계산과정을 거치게 된다.

$$FC = \sum_{k=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{i=1}^{N_w} \Delta F_c, [C = X, Y, Z] \quad (6)$$

본 연구에서는 이러한 계산의 복잡성을 줄이기 위하여 무차원화된 미소 절삭날의 절삭력 함수를 이용하였다. 식 (6)을 공구 회전각의 함수로 나타내면 다음과 같다.

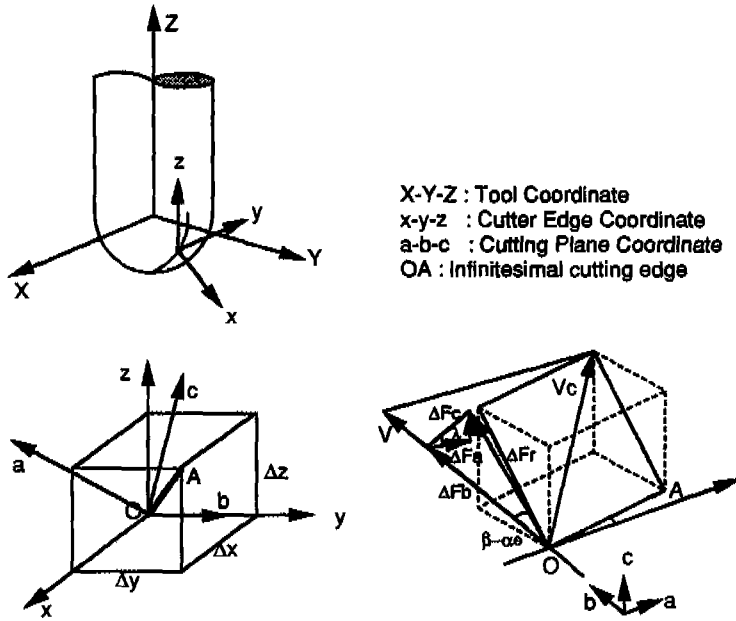


Fig. 3 Coordinates of the Plane Rake Faced Ball-End Mill

$$FX = C_1 \sin \Psi \cos \Psi + C_2 \sin^2 \Psi \quad (7)$$

$$FY = -C_1 \sin^2 \Psi + C_2 \sin \Psi \cos \Psi \quad (8)$$

$$FZ = C_3 \sin \Psi \quad (9)$$

식 (7)~식 (9)에서 나타낸 것과 같이 절삭력의 절대적인 크기는 절삭속도(cutting speed), 이송속도(feed rate), 공구의 위면 경사각(normal rake angle) 및 절삭날의 비틀림 각도(helix angle)의 함수인  $C_1$ ,  $C_2$  그리고  $C_3$ 에 영향을 받고 절삭력의 형태는 공구 회전각  $\Psi$ 에 영향을 받는다. 그러므로 Fig. 4에서와 같이 공구와 공작물이 접촉하고 있을 때  $\theta$  또는  $\Psi$

의 변화에 따른 절삭력 함수는 절삭 조건 및 공구의 형태에 따라 그 크기는 다르나 형태는 매우 비슷하기 때문에 대표적인 하나의 무차원 절삭력 함수로 나타낼 수 있다. 고속도 공구강으로 SM45C강을 가공할 때 미소 절삭날 한계가  $0^\circ$ 에서  $180^\circ$ 까지 회전하면서 가공할 경우 Fig. 5에 나타낸 절삭조건 및 공구 형상에 대하여 절삭력을 무차원화 하면 매우 비슷한 형태로 나타나며 각각을 무차원 절삭력 함수로 보간하면 Table 1과 Table 2와 같고 평균을 취하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{nz0} = 3.333E - 2 - 1.038E - 2\theta + 7.079E - 4\theta^2 - 6.948E - 6\theta^3 + 1.850E - 8\theta^4 \quad (10)$$

$$F_{ny0} = 2.432E - 2 + 1.731E - 2\theta + 1.378E - 4\theta^2 - 7.583E - 6\theta^3 + 5.628E - 8\theta^4 - 1.188E - 10\theta^5 \quad (11)$$

$$F_{nz\theta} = 0.407 \sin \theta \quad (12)$$

$$F_{nc\Psi} = 5.601E - 4\Psi^{1.699} \quad (13)$$

$$F_{ny\Psi} = 7.479E - 4\Psi^{1.600} \quad (14)$$

$$F_{nz\Psi} = 4.008E - 3 - 9.857E - 5\Psi + 3.303E - 4\Psi^2 - 2.287E - 6\Psi^4 \quad (15)$$

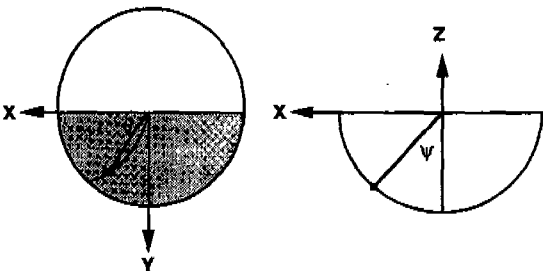


Fig. 4 Cutting Position of Cutter Edge Element

Table 1 Constants for Rotation Angle of Non-dimensional Cutting Forces

		$F_{nx}\theta = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3 + e\theta^4$ $F_{ny}\theta = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3 + e\theta^4 + f\theta^5$ $F_{nz}\theta = a \sin\theta$					
		a	b	c	d	e	f
F <sub>nx</sub> θ	(a)	3.442e-2	-1.104e-2	7.165e-4	-6.956e-6	1.839e-8	
	(b)	3.337e-2	-1.034e-2	7.074e-4	-6.948e-6	1.851e-8	
	(c)	3.329e-2	-1.058e-2	7.107e-4	-6.952e-6	1.848e-8	
	(d)	3.206e-2	-9.539e-3	6.965e-4	-6.930e-6	1.862e-8	
	AVG	3.333e-2	-1.038e-2	7.079e-4	-6.948e-6	1.850e-8	
F <sub>ny</sub> θ	(a)	2.568e-2	1.727e-2	1.467e-4	-7.632e-6	5.597e-8	-1.170e-10
	(b)	2.444e-2	1.728e-2	1.383e-4	-7.593e-6	5.637e-8	-1.190e-10
	(c)	2.360e-2	1.736e-2	1.397e-4	-7.601e-6	5.628e-8	-1.186e-10
	(d)	2.370e-2	1.731e-2	1.275e-4	-7.518e-6	5.659e-8	-1.207e-10
	AVG	2.432e-2	1.731e-2	1.378e-4	-7.583e-6	5.628e-8	-1.188e-10
F <sub>nz</sub> θ	(a)	0.424					
	(b)	0.405					
	(c)	0.425					
	(d)	0.373					
	AVG	0.407					

절삭력 선도를 무차원화 하여 나타내면 공구가 1회전 하는 동안 발생하는 절삭력의 크기를 상대적인 값으로 하여 최대값을 빠른 시간에 구할 수 있게 된다. Fig. 6 에서와 같이 공구와 공작물이 접촉하고 있을 경우 그때의 무차원화된 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$nFC = F_{nc\theta} \{F_{nc\psi}(\Psi_j) - F_{nc\psi}(\Psi_i)\}, [C = X, Y, Z] \quad (16)$$

이렇게 무차원화하여 나타내면 공구가 1회전할 때 상대적인 절삭력을 다음과 같이 간단한 형태로 구할 수 있게 된다.

$$FC = \sum_{k=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_\theta} nFC, [C = X, Y, Z] \quad (17)$$

즉, 식 (6)에 비하여 식 (16)은 계산과정이 많이 간단해진 형태임을 알 수 있다. 무차원화된 값으로부터 공구가 1회전하는 동안 총절삭력이 최대가 되는 각도 또는 각 방향의 절삭력이 최대가 되는 각도를 빠른 시간에 찾아 식 (6)에서 제시한 방법으로 절삭력을 구하면 최대값이 작용하는 각도와 그 값을 쉽게 계산할 수 있게 된다. 예를 들어 공구가 일회전하는 동안 nθ 각도

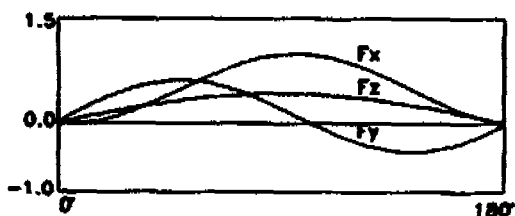
마다 계산을 하고 절삭날을 nψ 만큼씩 미소 요소로 나누는다면 기존의 모델에서 절삭력을 구하기 위해서는 O(nθ nψ)의 계산이 필요한 반면 무차원 절삭력 모델을 이용하여 최대 절삭력을 구하는 경우는 O(nθ)에 가까운 계산만이 필요하게 된다. 예를들어, 공구반경이 16mm이고, 절삭날을 90개의 미소 요소로 나누고 공구가 1회전 하는동안 1° 간격으로 절삭력을 계산할 때 무차원 방법은 기존 방법의 2.13%의 속도로 계산할 수 있었다.

### 3. 이송 속도 및 절삭 속도의 결정

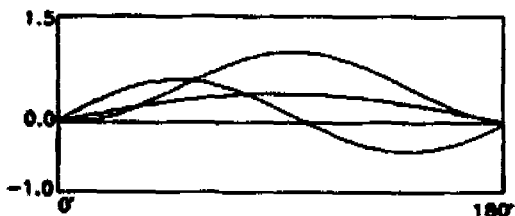
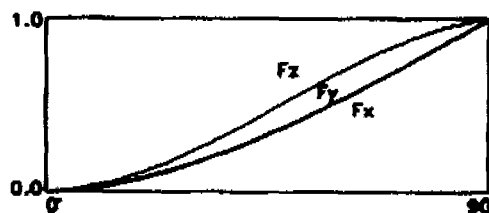
볼 엔드 밀링은 대부분 3차원 자유 곡면의 가공에 사용되기 때문에 공구와 공작물간의 접촉 상태가 수시로 변하여 절삭력의 변동을 유발하여 가공 불량을 초래한다. 특히 볼 엔드 밀의 기하학적 특성으로 인하여 공구의 정점에서는 가공이 일어나지 않고, 공구의 외각에서는 절삭 속도가 최대가 되기 때문에 공구의 마모가 심하게 일어난다. 절삭 속도는 공구 수명에 직접적인 영향을 주며, 이송 속도는 가공 시간과 표면 거칠기 및 절삭력에 밀접한 관계가 있다. 이러한 이유로 인하여

Table 2 Constants for Angular Position of Non-dimensional Cutting Forces

		$F_{nx}\psi = a\psi^a$ $F_{ny}\psi = a\psi^b$ $F_{nz}\psi = a + b\psi + c\psi^2 + d\psi^3$			
		a	b	c	d
F <sub>nx</sub> ψ	(a)	6.202e-4	1.647		
	(b)	5.548e-4	1.671		
	(c)	5.514e-4	1.674		
	(d)	5.154e-4	1.686		
	AVG	5.601e-4	1.699		
F <sub>ny</sub> ψ	(a)	8.327e-4	1.576		
	(b)	7.309e-4	1.685		
	(c)	7.235e-4	1.609		
	(d)	7.059e-4	1.610		
	AVG	7.479e-4	1.600		
F <sub>nz</sub> ψ	(a)	4.315e-3	-9.224e-5	3.406e-4	-2.410e-6
	(b)	4.313e-3	-1.361e-4	3.292e-4	-2.271e-6
	(c)	3.774e-3	-9.172e-5	3.296e-4	-2.282e-6
	(d)	3.609e-3	-1.219e-4	3.214e-4	-2.186e-6
	AVG	4.008e-3	-9.857e-5	3.303e-4	-2.287e-6



(a) feed : 0.05mm/tooth  
normal rake angle:10°



(b) feed : 0.08mm/tooth  
normal rake angle:15°

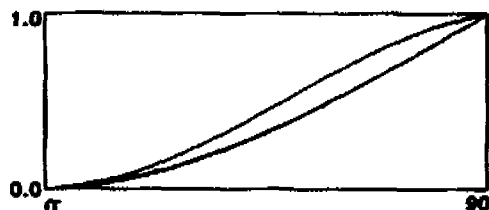


Fig. 5 Non-dimensional Cutting Forces for Cutter Edge Element of Ball-End Mill

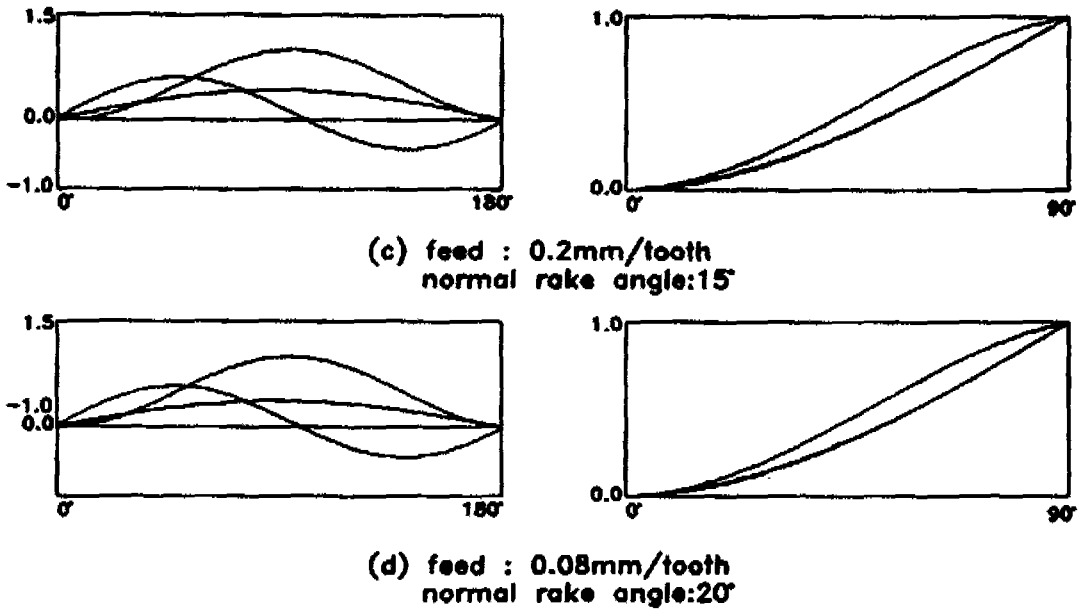


Fig. 5 Non-dimensional Cutting Forces for Cutter Edge Element of Ball-End Mill

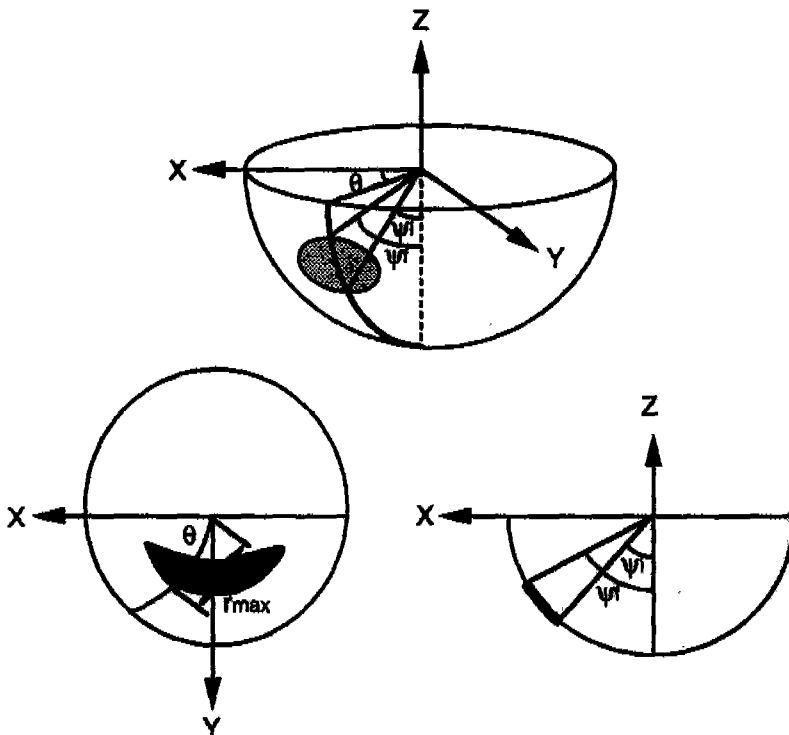


Fig. 6 Contact Area between Ball-End Mill and Workpiece

볼 엔드 밀링의 가공에서 적절한 절삭 조건을 부여하기 위해서는 이송 속도(feed)뿐만 아니라 절삭 속도(cutting speed)를 적절히 조절해야 한다. 즉, 공작물과 접촉하는 공구의 최외각 반지름에 따라 절삭 속도가 일정하게 유지될 수 있도록 공구 회전수를 조절하는 것이 필요하며 최대 절삭력 또는 최대 가공오차 이내로 가공할 수 있도록 이송 속도를 조절해 주어야 한다.<sup>[11]</sup>

Fig. 6과 같이 공구와 공작물이 접촉하고 있을 때 접촉하고 있는 공구의 최 외각 반지름( $r_{max}$ )으로 부터 최대 절삭속도( $V_{max}$ )이내로 작용할 수 있도록 공구 회전수를 다음과 같이 조절하여야 한다.

$$RPM = V_{max} / (2\pi r_{max}) \quad (18)$$

공구의 접촉 상태에 따라 절삭 속도가 주어지면 최대 절삭력 이내에서 가공할 수 있는 이송 속도를 구하기 위해서는 절삭력과 이송 속도가 선형적인 관계가 아니기 때문에 trial-and-error 방법으로 구해야 한다.

$$F_{total} = f(feed) \quad (19)$$

#### 4. NC 검증시스템의 개발 및 적용

##### 4.1 절삭실험 및 적용예

본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이 SM45C 재료를 코사인 커브의 형태를 갖는 공구궤적으로 절삭실험을 수행하였고, 공구는 지름이 10mm이고 날간 형상오차(run-out)가 0.005mm인 HSS 볼 엔드 밀을 이용하였다. 절삭력의 측정은 Kistler사의 공구 동력계를 이용하여 공구 1회전당 330개의 데이터를 측정하여 1mm간격당 최대값을 도출하였고 시뮬레이션 역시 1mm간격당 최대값을 도출하였다.

Fig. 8은 공구와 공작물이 접촉하고 있는 공구의 최외각 부위에서 절삭속도가 25m/min으로 유지될 수 있도록 공구의 회전수를 변화시켜 주면서 이송속도를 0.1mm/tooth로 가공한 실험이다. 공구와 공작물의 접촉이 공구의 외각부위로 갈수록 공구의 회전수는 감소하고 (Fig. 8(f)) 그때의 이송 속도도 또한 감소하는 (Fig. 8(e)) 결과를 볼 수 있다. 절삭력의 크기와 형태는 실

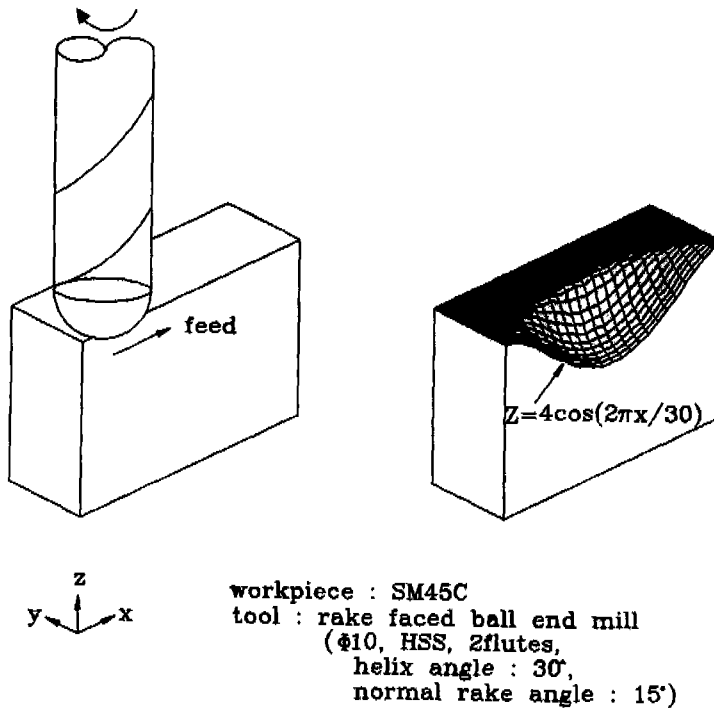


Fig. 7 The Prepared Workpiece and Tool for Experiment



험한 결과와 본 연구에서 제시한 알고리즘을 통해 얻은 예측값과 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 공구회전수 500RPM으로 일정하게 유지한 상태에서 총절삭력이 70Kgf를 넘지 않도록 이송속도를 부여하여 가공한 실험이다. 최대 이송속도를 0.1 mm/tooth인 상태에서 총 절삭력이 70Kgf를 넘는 부위에서만 이송속도를 조절하였고, (Fig. 9(e)) 그때의 총 절삭력은 실험한 결과가 예측한 결과보다 약간 높게 나타났다으나 설정한 최대 절삭력내로 가공할 수 있도록 이송속도를 조절할 수 있음을 보여주고 있다.

#### 4.2 검증시스템의 개발

볼 엔드 밀을 이용하여 3차원 자유곡면을 가공할 경우 적절한 가공이 되기 위해서는 공구와 공작물의 접촉 상황에 따라 이송 속도 뿐만 아니라 회전속도를 함께 조절해 주어야 한다. 이러한 작업을 하지않고 일정한 가공조건으로 3차원 자유곡면을 가공할때 절삭속도와 절삭력의 변동으로 인하여 공구마모, 휨, 떨림등 물리적인 오류가 발생할 수 있다.<sup>[12]</sup>

본 연구에서는 앞서 설명한 무차원화된 절삭력 모델을 NC 공구 궤적의 검증시스템에 적용하였다. (Fig. 10) 공구 재질과 공작물 재질에 따라 허용최대 절삭 속

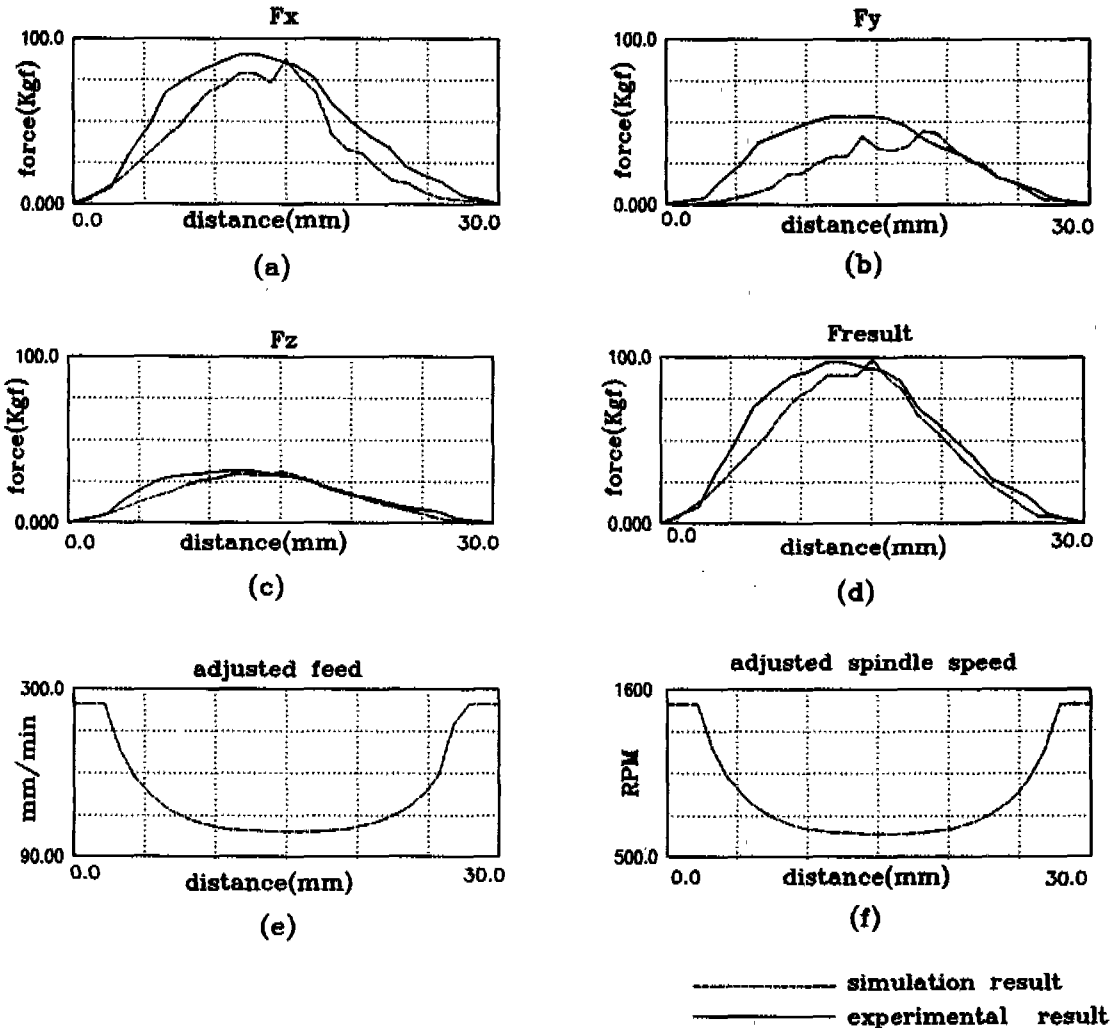


Fig. 8 Cutting Forces for Simulation and Experiment

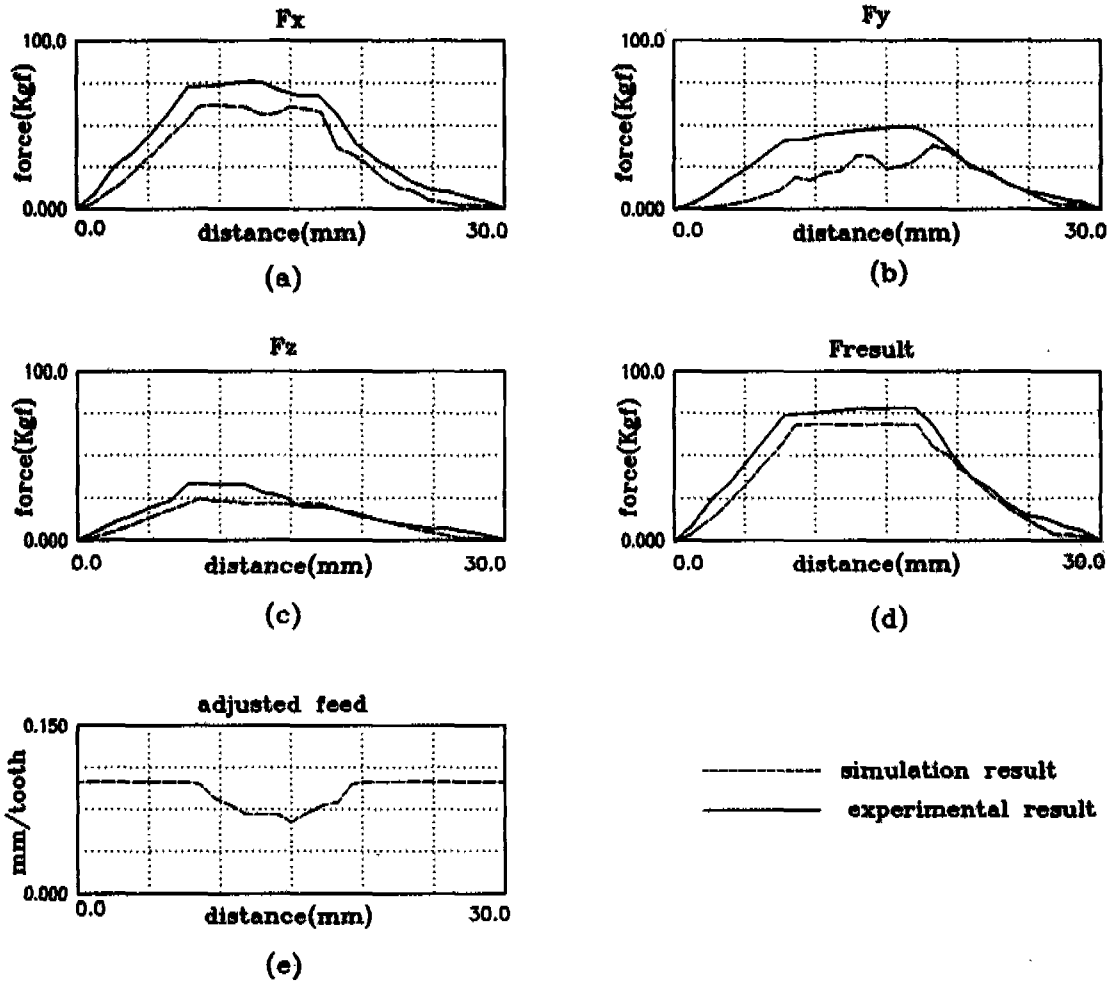


Fig. 9 Cutting Forces for Simulation and Experiment with Maximum Force Control

도를 넘지않는 범위에서 절삭 속도가 최대가 되도록 공구 회전수를 조정하고 최대 절삭력 또는 어느 한 방향의 절삭력이 설정값 이내로 작용하도록 이송 속도를 조절하여 최적의 절삭이 일어나도록 가공 조건을 설정할 수 있도록 하였다. 공작물의 형상을 Z-map의 형태로 표현한 후 공구의 이동체적(swept volume)과 접촉부위를 계산하고 이 접촉부위에 맞는 회전수와 이송 속도를 결정할 수 있었다.

Fig. 11은 IBM PC에서 MS-Windows환경하에서 개발된 NC 공구 궤적의 절삭 조건 검증 시스템을 보여주고 있다. 공구 궤적이 도시되면서 그때의 공구와 공작물간의 접촉 부위가 도시되고 또한 최대 절삭력이 도

시되어 가공중 발생하는 절삭력의 크기를 쉽게 알 수 있으며 조정할 수 있도록 하였다. 반경이 16mm인 볼 엔드 밀을 이용하여 가공할 때 최대절삭력이 100kgf이내로 작용하도록 이송 속도를 조절하였고, 절삭 조건이 조정된 공구 궤적으로 가공을 할 경우 절삭력의 분포를 Fig. 12에 나타냈다. Fig. 12에서 볼 수 있는 것과 같이 최대 절삭력이 100Kgf이내로 작용한 결과를 볼 수 있다. 본 검증시스템으로 검증된 공구 궤적으로 가공된 가공물을 Fig. 13에 나타냈다.

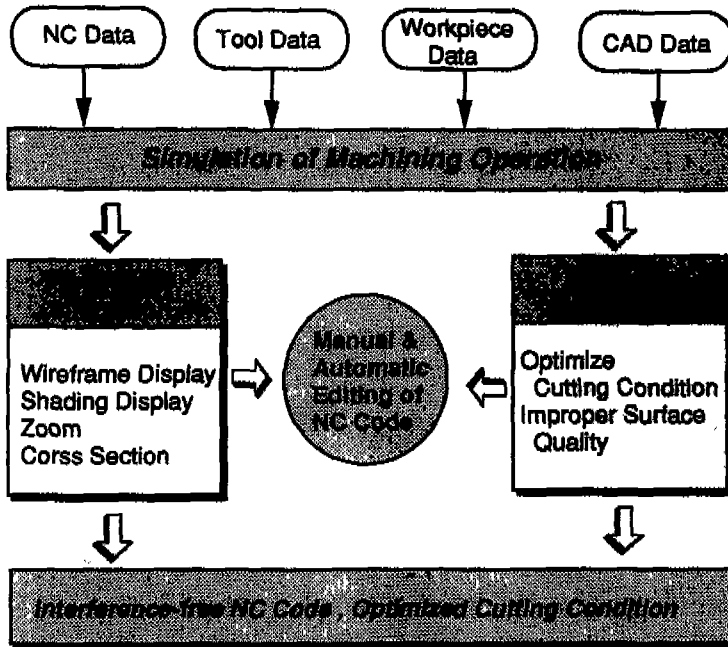


Fig. 10 Structure of CNC Verification System

### 5. 결 론

본 연구에서는 볼 엔드 밀링의 절삭력 계산을 효율적으로 할 수 있는 방법에 관하여 연구하였고 이를 NC 공구 궤적 검증 시스템의 기능으로 추가하여 절삭 조건을 검증 하였다. 제안된 무차원화 방법을 이용하여 최대절삭력을 구할때 기존 방법의 2.13%의 속도로 계산

할 수 있어 계산의 효율성을 한층 높일 수 있었다. 또한, NC 공구 궤적의 검증 시스템의 기능으로 추가하여 공구와 공작물의 접촉 상황에 따라 가공 속도와 이송 속도를 적절히 조정하여 최적의 절삭 가공이 일어날 수 있도록 하였다. 이러한 결과는 볼 엔드 밀링의 가공 효율성을 한층 높일 수 있을 것이며 CAM 시스템의 기능으로 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.



Fig. 11 The CNC Tool Path Verification System

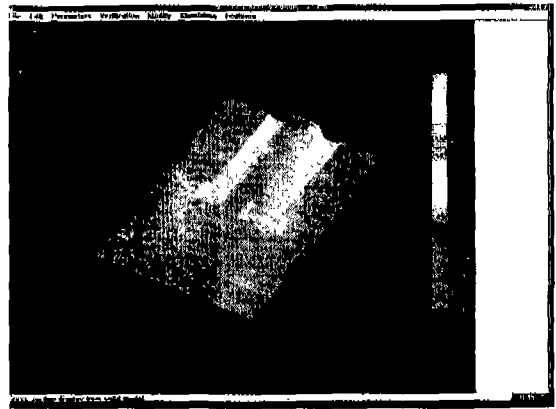


Fig. 12 Adjusted Force Map

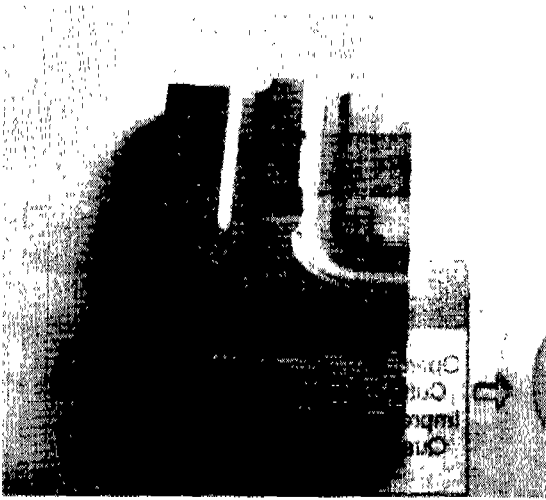


Fig. 13 Machined Part

참고문헌

1. Hosoi, T., Hoshi, "Cutting Actions of Ball-End Mill with a Spirial Edge", Annals of CIRP, Vol.25, No.1, pp.49~59.,1977
2. Aoyama, H., Kishinami, T., Saito, K., "Development of the Elliptic Ball-End-Mill", Bull. Japan. Soc. of Prec. Eng., Vol. 20, No. 4, Dec., pp.291~293, 1986
3. Kishiname, T. et al, "On Relationship between Cutting Ability and Cutting Edge Shape of Circular Cutting Edge Ball End Mill", J. of JSPE, Vol.48, No.7, pp.68~74, 1982
4. Aoyama, H., et al, "Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill", J. of JSPE, Vol. 53, No. 3, pp.461~466, 1987
5. Kishinami, T. et al, "A Theoretical analysis of Cutting Operation angle of Circular Cutting Edge Ball End Mill", J. of JSPE, Vol.47, No.11, pp.73~79, 1981
6. Jujio, Y., Iwabe, N., "Relationship between Cutting Force Curve and Working Accuracy with Ball-nose End Mills", J. of JSPE, Vol.48, No.1, pp.105~110, 1982
7. 박천경, 맹희영, "질삭성을 고려한 자유곡면 모형의 볼엔드 밀링 가공에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제15권, 제6호, pp.2048~2061, 1991
8. 박희덕, 양민양, "볼 엔드 밀에 의한 곡면가공의 질삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol.13, No.3, pp.433~442, 1989
9. 심충건, 양민양, "유연 볼 엔드밀에 의한 가공오차의 off-line제어", 대한기계학회논문집, Vol.16, No.3, pp. 468~484, 1992
10. 조현덕, 양민양 "볼 엔드밀 가공에서의 공구 처짐 예측과 정밀가공에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol.16, No.9, pp.1669~1680, 1992
11. Sehyung Park, Min-Yang Yang, Chongwoon Lee "Determining the Cutting Conditions for the Sculptured Surface" Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol.8, pp.61~70, 1993.
12. 김찬봉, 박세형, 양민양, "NC파트프로그램의 검증 및 오류 수정에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol.17, No.5, pp.1074~1083, 1993