

## 과도 절삭에서의 절삭 공정 시뮬레이션

고정훈(포항공대 대학원), 조동우(포항공대 기계공학과), 윤원수(터보테크),  
김주한(터보테크)

### Cutting Process Simulation in Transient Cuts

Jeong Hun Ko(Graduate School, POSTECH), Dong-Woo Cho(Dept. of Mech. Eng., POSTECH),  
Won Soo Yun(TurboTek Co.), Ju Han Kim(TurboTek Co.)

#### Abstract

In most of the existing mechanistic models, the cutting process simulation is often restricted to a single path machining operation under a fixed cutting condition. Complex cutting processes such as die or mold manufacturing, however, are performed under two- or three-dimensional multiple tool paths. Since the tool paths in CNC machining are composed of line and arc segments, transient cuts are frequently occurred due to the multiple paths. Even in steady cuts, the width of cut is varied with each segment. In this regard, this paper deals with the development of process simulation system for transient cuts, where continuously changing cutting configuration is computed, and then the cutting forces are predicted.

**Key Words** : transient cuts(과도절삭), cutting force(절삭력), cutting configuration(절삭 해석 변수)

#### 1. 서론

엔드밀링 공정은 가공물의 정밀도 항상 뿐만 아니라 가공 비용을 줄이기 위하여 광범위하게 연구되어 왔다. Kline과 DeVor 등<sup>(1)(2)</sup> 과 Sutherland와 DeVor<sup>(3)</sup>는 공구의 휨과 런아웃을 고려한 절삭력 모델을 개발했으며 가공 표면 형상오차를 예측하였다. Altintas와 Spence<sup>(4)</sup>는 솔리드 모델링 기법에 근거하여 절삭력 모델을 개

발했다. Amarego와 Deshpande<sup>(5)</sup>는 경사절삭이론에 기반하여 절삭력을 예측하였다. 또한 Yucesan 등<sup>(6)</sup>은 상면경사각(rake angle)과 칩 배출각(chip flow angle)을 고려한 3차원 절삭력 모델을 개발하였다. 최근에 Gu 등<sup>(7)</sup>은 평면밀링에 대하여 복잡한 공작물 형상, 2차원 공구경로, 복합경로 가공, 기계 셋업 오차들을 고려한 절삭력 모델을 발표하였다.

대다수의 절삭력 모델들은 절삭력 예측에 결정적인 역할을 하는 절삭계수값을 가공조건 또는 공구회전각의 함수로 가정하여 결정하였다. 그러나 일반적인 포켓가공에서 절삭 조건은 급격하게 변하고 이러한 절삭조건에 대해서 절삭계수값을 찾기 위해서는 광범위한 테스트 가공이 수반되어야 한다. 그래서 대부분의 절삭력 모델들은 고정된 절삭 조건에서 절삭력을 예측하고 있다.

본 연구에서는 절삭조건이나 공구회전각에 상관없이 주어진 공구와 공작물에 대해서 일정한 값을 갖는 절삭 계수값을 사용하였다. 그리고 절삭 조건이 변하는 과도 절삭에서 절삭력 예측에 필요한 절삭 해석 변수(cutting configuration)를 유도하고 개발된 절삭력 모델을 이용하여 절삭력을 예측하여 측정값과 비교하였다.

#### 2. 절삭력 모델

절삭력 모델은 기존의 다른 연구들에 의해 제안된 모델들의 기본개념에 따르며 3차원 경사 절삭으로 확장하도록 한다. 그림 1에 본 연구에

서 사용한 공구의 형상과 좌표계등을 나타내었다.

엔드밀링 공구는 절삭깊이 내에서 다수의 디스크 요소로 나뉘어지며, 각각의 요소에 작용하는 힘성분을 합함으로서 임의의 공구 회전각에서의 3차원 절삭력을 계산할 수 있다. j번째 공구 회전 위치각에서 i번째 날의 k번째 축방향 디스크 요소에서의 위치각은 다음의 식으로 주어진다.

$$\phi(i, j, k) = \alpha(i, k) + \theta(j) \quad (1)$$

$$\alpha(i, k) = (i-1) \frac{\pi}{2} + (k\Delta a + \Delta a/2) \frac{\tan \theta_h}{R} \quad (2)$$

$$\theta(j) = -j\Delta\theta \quad (3)$$

여기서  $\alpha(i, k)$ 는 j가 0일 때의 절삭날의 위치각,  $\theta(j)$ 는 공구 회전각이며,  $\Delta a, \theta_h, R$ 는 미소 디스크 요소의 높이, 헬릭스 각, 공구 반경을 나타낸다.

상면경사면(rake face)에 작용하는 절삭력 성분, 수직력( $dF_n$ )과 마찰력( $dF_f$ )은 다음식과 같

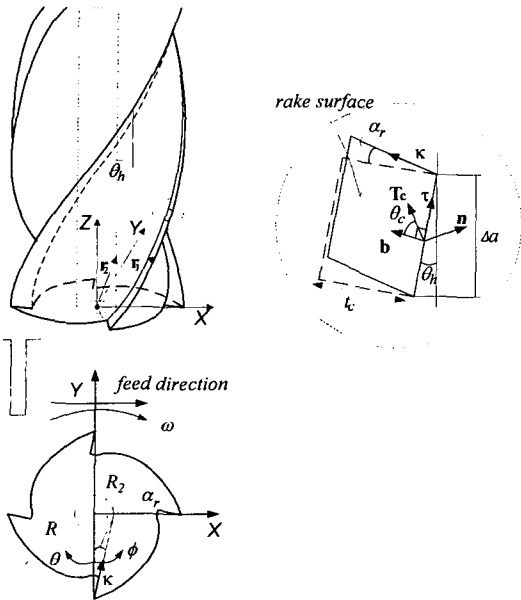


Fig. 1 Cutter geometry, coordinate system, and unit vectors on the rake surface

이 주어진다.

$$dF_n(\phi) = K_n A(\theta) \vec{n}(a) dA_c \quad (4)$$

$$dF_f(\phi) = K_f K_n A(\theta) \vec{T}_c(a) dA_c \quad (5)$$

$$dA_c = t_c(\phi) \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h) \quad (6)$$

여기서  $K_n, K_f$ 는 절삭계수값중에서 비절삭 저항을 나타내는 값이며,  $\alpha_r$ 는 상면경사각(rake angle)이다.

또한  $\vec{n}, \vec{T}_c$ 는 공구 형상으로부터 계산되는 값이며 상면(rake face)에서의 수직, 칩 배출 벡터이다.  $A(\theta), t_c(\phi)$ 는 각각 3차원 좌표변환 행렬, 미변형 칩두께이다.

수직력과 마찰력을 이용하여 절삭력을 직교 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$F_{x,ijk} = [C_1 K_n \cos(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \cos \phi - K_f K_n C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1$$

$$F_{y,ijk} = [C_1 K_n \sin(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \sin \phi + K_f K_n C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1$$

$$F_{z,ijk} = [-C_2 K_n + K_f K_n C_5] t_c(\phi) B_1 \quad (7)$$

식 (7)에서  $C_1, C_2, B_1$ 는 상수값이며  $C_3, C_4, C_5$ 는 칩 배출각( $\theta_c$ )의 함수로 주어진다

$$\begin{aligned} B_1 &= \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h) \\ C_1 &= \cos \theta_h / \sin \theta_{tk} \\ C_2 &= \sin \theta_h / \sin \theta_{tk} \\ C_3 &= \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{tk}) \\ C_4 &= \cos \theta_c / \sin \theta_{tk} \\ C_5 &= \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{tk}) \\ \cos \theta_{tk} &= \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h \end{aligned} \quad (8)$$

공구의 회전각에 따른 각방향 절삭력 성분은 식 (9)와 같이 나타나며, 실험을 통하여 측정된 절삭력( $F_j$ )을 이용하여 공구 회전각에 따른 절삭계수값,  $K_n, K_f, \theta_c$ 를 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$F_j = \sum_k \sum_i F_{ijk} \quad (9)$$

본 논문에서 사용하는 절삭력 계수는 절삭 조건에 의존하지 않는 상수값이며 보다 정밀한 절삭력 예측을 위해 치수 효과(Size Effect)를 고려하였다.<sup>(9)</sup> 미변형 칩두께는 공구의 런아웃과 휨을 고려하여 공구의 회전각 및 z축 디스크요소에 대해서 계산하는 기법을 사용하였다.<sup>(10)</sup>

### 3. 과도 절삭에서 절삭력 예측

#### 3-1. 과도 절삭에서 Cutting Configuration 산출

Cutting configuration은 공칭 위치와 공칭 위치에서 entry/exit각도, 절삭 조건 그리고 이송 방향을 포함한다. Cutting configuration은 과도 절삭 동안에 연속적으로 변한다. 과도 절삭에서 절삭력을 예측하기 위해 cutting configuration이 먼저 계산되어야 한다.

예를 들면 그림 3(a)의 경우에서 절삭 과정은 다음과 같이 나눌 수 있다.

- (a) air-cutting 단계 : A에서 B까지의 영역
- (b) 공구 진입 단계(cutter engaging step) : B에서 C까지의 영역
- (c) 정상 절삭 단계(steady cutting step) : C에서 D까지의 영역
- (d) 코너 절삭 단계(corner cutting step) : D에서 E까지의 영역
- (e) 정상 절삭 단계(steady cutting step) : E영역 이상

공구의 x와 y 방향 이송이 주어진다면 공구의 공칭 위치는 다음과 같다.

$$x_n(j) = x_n(j-1) + f_{tx} \cdot \frac{n_f}{n_\theta} \cdot j \quad (16)$$

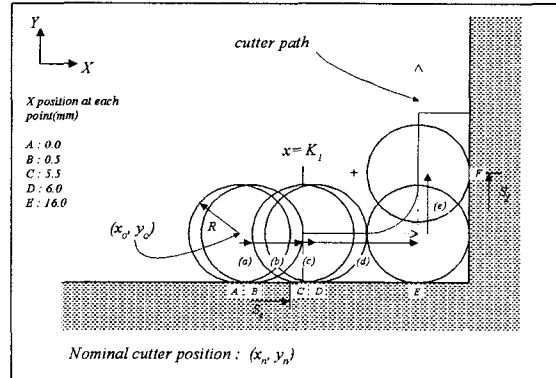
$$y_n(j) = y_n(j-1) + f_{ty} \cdot \frac{n_f}{n_\theta} \cdot j$$

여기서  $n_f$ 는 날수이고  $n_\theta = 360^\circ / \Delta\theta$ 이다.

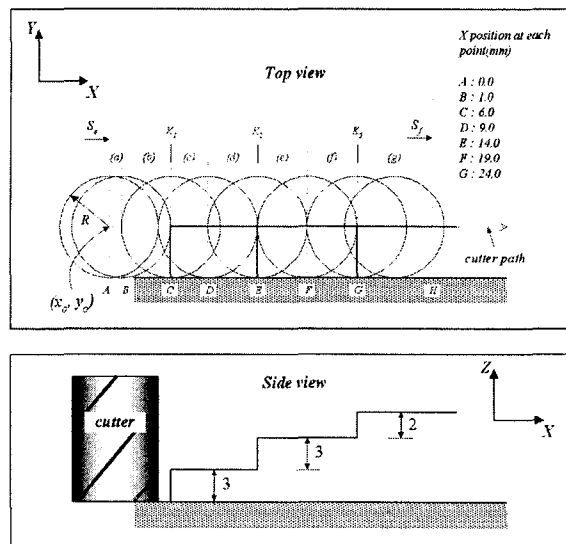
위의 식에서  $f_{tx}$ 와  $f_{ty}$ 는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{tx} &= f_t \cdot \cos \beta \\ f_{ty} &= f_t \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $\beta$ 는 공구 이송 방향의 기울기이다.



(a) Transient cut at the intersection of line tool path segments



(b) Transient cut that cutting depth are stepwise changed

Fig. 3 Transient cuts frequently occurred in two-dimensional end milling process.

그림 3(a)에서는 공구가 A에서 F까지 움직인다. 단계 b의 영역에서 공구의 entry/exit각도는 공구와 시편의 교차점을 사용함으로써 공구의 움직임에 따라 계산될 수 있다.

그림 4에서 보듯이 공구의 공칭 위치에서 공구와 시편의 한쪽 편은 식 18과 식 19와 같이 정의될 수 있다.

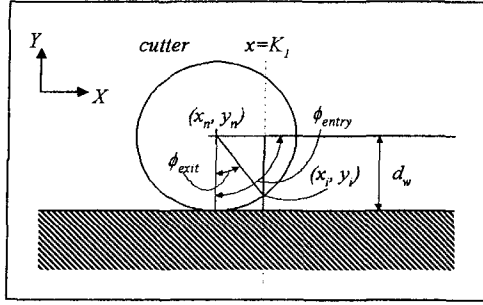


Fig. 4 Entry and exit angles of a cutter when a cutter engages the workpiece.

공구:

$$(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = R^2 \quad (18)$$

시편:

$$x = K_1 \quad (19)$$

식 18과 식 19로부터 교차점은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= K_1 \\ y_i &= y_n \pm \sqrt{R^2 - (K_1 - x_n)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

공구의 exit 각도는 교차점  $(x_i, y_i)$  와 공칭 위치  $(x_n, y_n)$ 를 이용하여 식 21과 같이 얻어질 수 있다.

$$\tan \phi_{exit} = \frac{(x_i - x_n)}{(y_n - y_i)} \quad (21)$$

그래서 공구의 exit 각도는 식 22와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{exit} = \beta + \tan^{-1} \left[ \frac{K_1 - x_n}{\sqrt{R^2 - (K_1 - x_n)^2}} \right] \quad (22)$$

그리고 entry 각도는 식 23과 같이 주어질 수 있다.

$$\phi_{entry} = \beta + \cos^{-1} \left( 1 - \frac{d_w}{R} \right) \quad (23)$$

단계 (c)의 steady cut에서는 다음과 같이 얻

어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{entry} &= \beta + \cos^{-1} \left( 1 - \frac{d_w}{R} \right) \\ \phi_{exit} &= \beta \end{aligned} \quad (24)$$

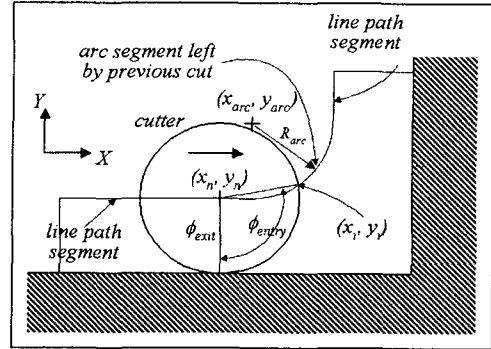


Fig. 5 Detailed schematic diagram for step (d) in Fig. 3(a).

스텝 (d)는 포켓 가공에서 빈번히 일어나는 코너 절삭의 경우이다. 이 단계에서 공구가 공구 경로 구간을 따라 움직임에 따라 반경 방향 절삭 깊이가 증가한다. 단계 (d)에서 상세한 도식이 그림 5에서 표시된다. 그림 5에서 이전 절삭에서 남겨진 공구와 원호 구간은 다음과 같이 정의될 수 있다.

이전 절삭에 의해 남겨진 원호 구간:

$$(x - x_{arc})^2 + (y - y_{arc})^2 = R_{arc}^2 \quad (25)$$

공구:

$$(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = R^2 \quad (26)$$

여기서  $(x_{arc}, y_{arc})$ 와  $R_{arc}$ 는 그림 5에서 보여 주듯이 공구 중심과 원호 구간의 반경이다.

교차점  $(x_i, y_i)$ 는 식 25와 26으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= -Py_i + Q \\ y_i &= \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{y_n - y_{arc}}{x_n - x_{arc}} \\
 Q &= \frac{R_{arc}^2 - R^2 + x_n^2 + y_n^2 - x_{arc}^2 - y_{arc}^2}{2(x_n - x_{arc})} \\
 A &= (P^2 + 1) \\
 B &= -(2PQ - 2x_nP + 2y_n) \\
 C &= Q^2 + x_n^2 - 2x_nQ + y_n^2 - R^2
 \end{aligned} \quad (28)$$

단계 d에서 공구의 entry 와 exit 각도는 방정식 29와 30과 같이 나타내 질 수 있다.

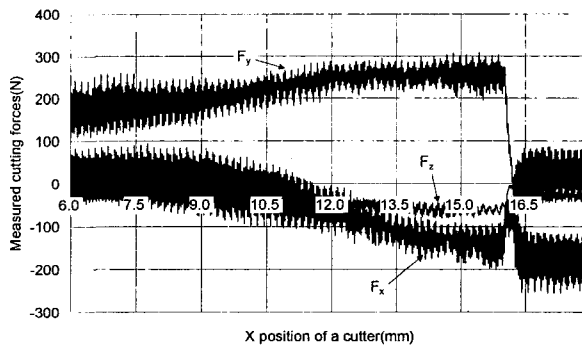
$$\phi_{entry} = \beta + \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{y_i}\right) \quad (29)$$

$$\phi_{exit} = \beta \quad (30)$$

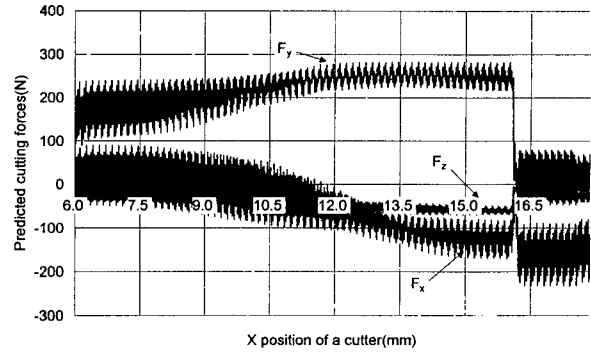
### 3-2. 실험과 시뮬레이션 사이의 비교

각 과도 절삭에서 공정 시뮬레이션은 그림 3의 (a), (b)의 가공 상황에서 이루어졌다. 각각의 경우에서 유도된 cutting configuration이 사용되었다. HSS 10  $\phi$  4날 평면 엔드밀 공구를 사용하였으며 대우중공업의 수직형 머시닝 센터 ACE-V30에서 실험하였다. 시편은 알루미늄을 사용하였다.

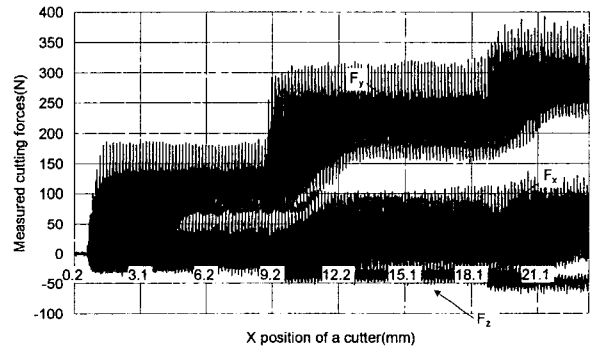
그림 6에서 그림 3의 (a)와 (b)의 경우에 대해 절삭력의 예측값과 측정값은 모양과 크기에 있어 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.



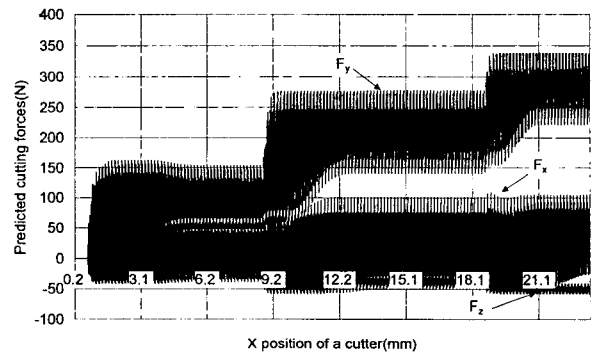
(a) Measured cutting forces for partial cutting range in the case of Fig. 3(a).



(b) Predicted cutting forces for partial cutting range in the case of Fig. 3(a).



(c) Measured cutting forces for the full cutting range in the case of Fig. 3(b).



(d) Predicted cutting forces for the full cutting range in the case of Fig. 3(b).

Fig. 6 Comparison of measured cutting forces and predicted cutting forces

#### 4. 결론

본 연구는 과도 절삭에서 절삭력을 예측하는 시뮬레이션 시스템의 개발에 목적을 두고 있다. 포켓 가공에서 cutting configuration이 연속적으로 변하는 경우에 대해 절삭력을 예측할 수 있는 방법을 제시하고 있다. cutting configuration은 공구, 시편, 경로 구간의 형상 정보로부터 얻어진다.

본 논문에서 다양한 과도 절삭에 대해서 예측된 절삭력의 크기와 형상은 측정값과 잘 일치한다. 특별히, 기존의 기계적 모델이 예측할 수 없었던 절삭력의 특성들을 제시된 시뮬레이션 방법에서 정확히 예측할 수 있다. 이러한 결과들로부터 제시된 시스템은 다중 2차원 공구 경로의 절삭 공정 시뮬레이션에 대해 효과적으로 구현될 수 있다고 주장할 수 있다. 이것은 개발된 시뮬레이션 시스템이 공정 계획자에게 유용한 도구로써 제시될 수 있음을 암시한다.

#### 후 기

본 연구는 (주)터보테크 주관의 1999년도 산업기반기술과제의 위탁 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) W. A. Kline, R. E. DeVor, and R. Lindberg, "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, 1982.
- (2) W. A. Kline and R. E. DeVor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123-140, 1983.
- (3) J. W. Sutherland and R. E. DeVor, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems", Vol. 108, pp. 269-279, November 1986.
- (4) Y. Altintas and A. D. Spence, "End Milling Force Algorithms for CAD Systems", *CIRP Annals*, Vol. 40, NO. 1, pp. 31-34, 1991.
- (5) E. J. A. Amarego, and N. P. Deshpande, "Computerized End-Milling Force Predictions with Cutting Models Allowing for Eccentricity and Cutter Deflections", *CIRP Annals*, Vol. 40, NO. 1, pp. 25-29, 1991.
- (6) G. Yucesan, Q. Xie, and A. E. Bayoumi, "Determination of Process Parameters through a Mechanistic Force Model of Milling Operations", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 4, pp. 627-641, 1993.
- (7) F. Gu, S. G. Kapoor, R. E. DeVor and P. Bandyopadhyay, "An Enhanced Cutting Force Model for Face Milling with Variable Cutter Feed Motion and Complex Workpiece Geometry", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 119, pp. 467-475, November 1997.
- (8) W. S. Yun and D. W. Cho, "An Improved Method for the Determination of 3D Cutting Force Coefficients and Runout Parameters in End Milling", *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.16, No.12, pp.851-858, 2000.
- (9) W. S. Yun, D. W. Cho, "An improved cutting force model considering the size effect in end milling", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida*, pp.223-229 November 5-10, 2000.
- (10) W. S. Yun and D. W. Cho, "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting Condition Independent Coefficients in End Milling", *Int. J. of Machine Tools and manufacture*, Vol.41, Issue 4, pp.463-478, March 2001.