

절삭력을 이용한 엔드밀링 절입깊이 추정

Estimation of End Milling Depth of Cuts Using the Cutting Force

최 중 근*(한국과학기술원), 양 민 양(한국과학기술원 기계공학과)
 Jong-Geun Choi(KAIST), Min-Yang Yang(KAIST)

ABSTRACT

In the end milling process, the information of axial and radial depths of cut plays an important role in adaptive control systems for precision machining and tool monitoring systems for unmanned machining. In general, it is not easy to know the depths of cut due to irregular shape of workpieces, inaccurate positioning of them on the table of machine tool and machining error in previous cutting. In addition to, even they are informed, it is difficult to match the individual position of the cutter on the varying shape of the work material. This work suggest an algorithm estimating the depths of cut based on cutting force signal. The proposed algorithm can be applied in more extensive cutting situations, for example, presence of the tool wear, variation of work material hardness, etc.

1. 서 론

절삭가공에 있어서 가공중 절입깊이의 추정은 오차발생 억제를 목표로 하는 적응제어시스템이나 가공무인화를 위한 공구상태감시시스템에 있어서 매우 중요하다. 엔드밀링의 가공정도 향상을 위한 기하적응제어시스템에서 가공오차의 추정은 흔히 측정이 용이한 절삭력을 이용하여 이루어진다. 이러한 오차추정방안은 절입깊이에 대한 정보없이는 효과적으로 이루어지기 어렵다. 이는 동일한 절삭력이라 할지라도 공구축방향의 절입깊이에 따라서 가공오차의 크기는 크게 달라질 수 있기 때문이다. 한편, 공구상태감시시스템에서 가공중 센서신호를 이용하여 정상상태로부터 공구파손, 마멸 등의 이상상태를 구별하기 위해서는 임계치(Threshold value) 설정이 필요하다. 많은 경우 이러한 임계치는 가공조건에 따라 탄력적인 변화가 요구되며, 특히 절입깊이의 변화에 대하여 민감하게 조정되어야 한다.

비록 엔드밀링에 관한 지금까지의 많은 연구에서 절입깊이가 문제의 단순화를 위해서 주어졌지만 이는 보다 실제적인 상황에서 직면하는 바와는 크게 다르다. 엔드밀링에 있어서 절입깊이는 소재형상의 불확실, 세팅시의 유연성, 선행가공에서의 가공오차 등에 기인하여 정확히 주어지기 어렵고, 설명정보를 갖고 있다해도 개개의 가공형상을 현재의 공구위치와 일치시키는 것도 용이하지 않기 때문이다. 따라서 인프로세스 오차제어시스템 및 공구상태감시시스템 등에서는 더 이상 이를 단순화하기 어

렵다.

엔드밀링공정에서 절입깊이의 실시간추정에 관한 연구는 I. Yellowley⁽¹⁾, T. Watanabe⁽²⁾, J. H. Tarn and M. Tomizuka⁽³⁾, Y. Altintas and I. Yellowley⁽⁴⁾ 등에 의하여 이루어진 바 있다. 그러나 이들의 연구는 공구 및 소재에 따른 인자조정(Calibration)이 필요하고, 적용 범위의 제한 및 측정이 용이하지 않은 가공인자 요구 등의 어려움을 갖고 있어 활성화 되지 못하고 있다.

본 연구의 목적은 절삭력신호의 변화양상을 이용하여 보다 폭넓은 가공조건에서 절입깊이를 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이다.

2. 절삭력 형태의 변화

절삭날이 비틀림각 α_n 를 갖는 엔드밀을 이용한 가공에서 어느 한 순간 개개의 절삭날들에 의한 절입량은 공구회전각위치에 따라 다르게 된다. 따라서 이들 절입량의 차이를 용이하게 계산에 반영하기 위해서는 Fig. 1에서와 같이 엔드밀을 두께가 얇은 원판요소로 나누어 생각하는 것이 필요하다.

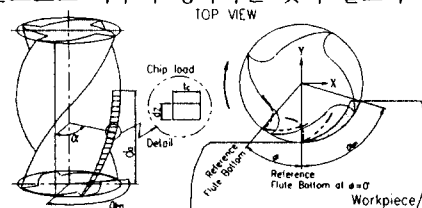


Fig. 1 Chip load distribution model in the end milling

그림에서 하나의 원판요소를 고려할 때 공구회전속도가 이송속도에 비해 충분히 커서 날끝운동을 원형궤적으로 근사할 수 있으면 기준점으로부터 α 에 위치한 절삭날에 의한 절입량 t_c 는 날당 이송량 f_t 를 가지고 다음 식(1)로 표현된다.

$$t_c = f_t \sin \alpha \quad (1)$$

절삭력은 절입량과 비절삭 저항계수의 곱으로 표현될 수 있으므로 주어진 절입깊이에 대한 순간 절삭력은 다음 식(2)로 표현될 수 있다.

$$F = \sum_{k=1}^{N_t} \int_0^{d_k} K f_t \sin \alpha dz \quad (2)$$

여기서 α 는 절삭날의 공구축방향 위치 z 와의 기하관계에 따라 다음 식(3)의 관계가 있으므로 이를 이용하여 식(2)에서의 적분인자를 각도변위로 치환하면 순간절삭력은 다시 식(4)의 형태로 표현된다.

$$\alpha = \frac{\tan \alpha_h}{R} z \quad (3)$$

$$F = \sum_{k=1}^{N_t} \int_{\alpha_{L,k}}^{\alpha_{U,k}} K \frac{R}{\tan \alpha_h} f_t \sin \alpha d\alpha \quad (4)$$

$$= K \frac{R}{\tan \alpha_h} f_t A(\alpha)$$

여기서 $\alpha_{U,k}$, $\alpha_{L,k}$ 는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 각각 k 번째 절삭날에 의한 절입부하(Chip load)의 상한(Upper limit)과 하한(Lower limit)이며, $A(\alpha)$ 는 절입부하함수(Chip load function)로서 다음과 같이 정의된다.

$$A(\alpha) = \sum_{k=1}^{N_t} [\cos \alpha_{L,k} - \cos \alpha_{U,k}] \quad (5)$$

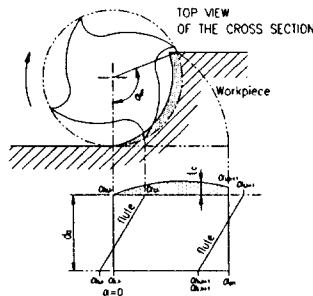


Fig. 2 Engaged flute and chip load sweep angle

또, Fig. 2에서와 같이 $\alpha_{L,k}$, $\alpha_{U,k}$ 를 각각 k 번째 절삭날이 절입영역의 하한과 상한을 가로지르는 공구회전각이라 하면, 이들은 다음 식(6), 식(7)과 같이

계산될 수 있으므로 $\alpha_{U,k}$, $\alpha_{L,k}$ 는 식(8), 식(9)로 얻어진다.

$$\alpha_{b,k} = (k-1) \frac{2\pi}{N_t} - \phi \quad (6)$$

$$\alpha_{b,k} = (k-1) \frac{2\pi}{N_t} - \phi + \beta \quad (7)$$

$$\alpha_{L,k} = \begin{cases} 0 & \text{when } -\beta \leq \alpha_{b,k} < 0 \\ \alpha_{b,k} & 0 \leq \alpha_{b,k} < \alpha_m \\ \emptyset & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha_{U,k} = \begin{cases} \alpha_{i,k} & \text{when } 0 \leq \alpha_{i,k} < \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_m \leq \alpha_{i,k} < \alpha_m + \beta \\ \emptyset & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서 α_m 와 β 는 각각 공구절입각과 공구회전절면각으로 다음 식(10), 식(11)로 주어진다.

$$\alpha_m = \cos^{-1} \left(1 - \frac{d_c}{R} \right) \quad (10)$$

$$\beta = \frac{d_a}{R} \tan \alpha_h \quad (11)$$

한편, 식(5)에 의해 얻어지는 절입부하는 공구축방향 절입깊이 d_c , 공구회방향 절입깊이 d_r 과 공구회전각 ϕ 에 따라서 달라진다. Fig. 3은 이러한 가공부하를 설명하기 위한 것으로 펼쳐 그린 절입부하영역(Chip load area)과 여기에 절입된 절삭날들을 보여준다. 그림에서 하나의 절삭날에 대한 절입과정을 살펴보면, 공구회전에 따라 절입부하영역의 a 점에서 절입이 시작되어 q 점을 지나므로서 절입과정이 끝난다.

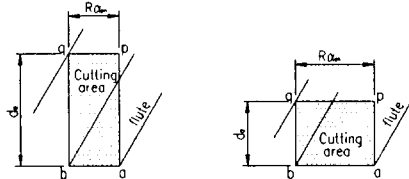


Fig. 3 Flute sweep for the cutting area

절삭력변화와 가공조건사이의 검토로서 먼저 절삭날의 하나가 a 점을 지나는 순간의 절삭력 변화를 살펴보기로 한다. 이 순간의 절삭날들에 의한 절입형태는 알고리즘의 적용범위를 $d_c \leq 5R$ 로 할 때 Fig. 4에서 보여지는 7가지 형태가 가능하다. 이들중 하나의 예로서 그림 (r6)의 절입형태는 공구축방향 절입깊이와 공구회전절입각이 각각

$$\begin{aligned} 0 < d_c < d_{a1} \\ 90^\circ < \alpha_m < 180^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

의 범위로 주어지는 경우이다. 여기서 d_{a1} 은 공구축 방향에서의 절삭날 간격에 해당하는 절입깊이로

$$d_{a1} = \frac{R}{\tan \alpha_h} \frac{2\pi}{N_t} \quad (13)$$

으로 주어지며, $d_a > d_{a1}$ 이면 가공면 형성에 둘 이상의 절삭날이 동시에 관여하는 공구회전구간이 존재하게 된다.

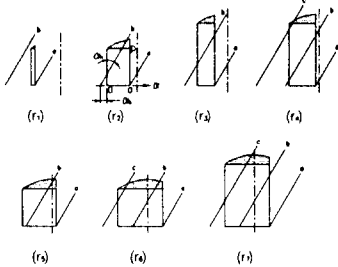


Fig. 4 Flute engaged shape with a flute positioning at 'a'

그림에 설정된 좌표를 이용하여 이에 대한 절입부하함수를 α_b 를 변수로 하여 구하면

$$A(\alpha_b) = -(\cos \beta + \sin \beta - 1) \cos \alpha_b - (\cos \beta - \sin \beta + 1) \sin \alpha_b + (1 - \cos \alpha_m) \quad (14)$$

로 된다. 이제 공구가 회전할 때 절입부하의 변화율을 구해보면

$$A'(\alpha_b) = A \sin \left\{ \alpha_b - \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta - \sin \beta + 1}{\cos \beta + \sin \beta - 1} \right) \right\} \quad (15)$$

$$\text{where } A = \sqrt{(\cos \beta + \sin \beta - 1)^2 + (\cos \beta - \sin \beta + 1)^2}$$

으로 되고, 절입부하의 변화율이 0이 되는 α_b 를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha_b \Big|_{A'(\alpha_b)=0} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \beta - \sin \beta + 1}{\cos \beta + \sin \beta - 1} \right) \quad (16)$$

여기서 주어진 절입깊이에 대한 α_b , β 의 범위가 다음 식(17)로 됨을 고려하면 식(16)에서 괄호안의 분모, 분자는 모두 양의 값을 갖는다. 따라서 식(16)으로 구해지는 α_b 는 주어진 유효 범위내에 있으므로 극점이 $0 \leq \alpha_b < 90^\circ$ 사이에 존재한다.

$$\begin{aligned} 0^\circ &\leq \beta \leq 90^\circ \\ 0^\circ &\leq \alpha_b \leq 90^\circ \end{aligned} \quad (17)$$

또 최대, 최소를 판단하기 위해서 이 점에서의 2차 미분값을 구하면 0보다 크므로 극소이다. 한편, 계산상의 극소는 절삭날이 a점을 지나는 순간에 대

하여 검토된 것이므로 실제 절삭과정에서 절삭력의 극소가 되기 위해서는 이 점에 다다르기 전상태에서 절삭력의 감소가 확인되어야 한다. a점 도달 직전에 대한 절입부하함수를 세우면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(\alpha_b) &= -(\cos \beta + \sin \beta - 1) \cos \alpha_b \\ &\quad - (\cos \beta - \sin \beta) \sin \alpha_b + 1 \end{aligned} \quad (18)$$

이 식을 앞서와 비슷하게 검토하면 이 영역에서의 절입부하는 단조감소함을 알 수 있다. 이상을 종합하면, 식(16)으로 결정되는 값보다 작은 α_b 를 갖는 가공조건에서 절삭날의 하나가 a점에 위치할 때 순간절삭력은 최소가 되며, a점을 지난후 절삭력은 다시 증가함을 알 수 있다. 비슷한 방법으로 Fig. 4에 나타난 모든 경우에 대하여 절삭력의 증감여부에 대한 검토가 가능하다. 다음으로 Fig. 4에서 절삭날 하나가 p점을 지나는 순간을 생각할 때, 고려중인 절입깊이 범위에서 이러한 절입형태는 Fig. 5와 같이 모두 7가지가 있으며, 앞서와 비슷한 방법으로 이 점들에서의 절삭력 변화에 대한 검토가 가능하다.

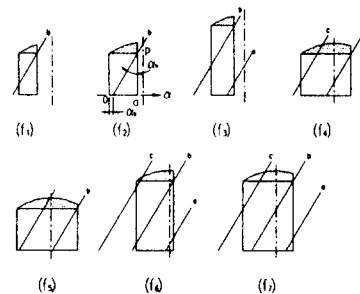


Fig. 5 Flute engaged shape with a flute positioning at 'p'

3. 절입깊이 추정 알고리즘

지금까지의 검토결과에 비틀림각 $\alpha_h = 30^\circ$ 인 엔드밀을 적용하고 절입부하의 증가율 혹은 감소율이 0이 되는 α_b 와 이에 대응되는 공구축방향 절입깊이 d_a 와 공구횡방향 절입깊이 d_r 을 구하여 이들을 절입깊이의 영역으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 그림(a)는 절삭날이 a점을 지날 때 최소가 되는 절입깊이 영역을 나타내며, 그림(b)는 절삭날이 p점을 지날 때 최대가 되는 절입깊이 영역을 나타낸다. 또한 이들 두 결과를 하나의 절입영역에 나타내면 그림(c)와 같이 중복되는 영역이 구해진다. 사선으로 표시된 중복영역은 절삭날의 하나가 a점에 위치할 때 절삭력이 최소로 되고 그후 단조증가하는 절입깊이

영역이 되며, 동시에 절삭날 하나가 p 점에 위치할 때 최대 절삭력이 되고 그 후 단조감소하는 절입깊이 영역이 된다.

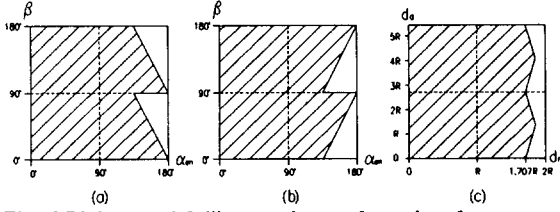


Fig. 6 Rising and falling regions of cutting force
(a) rising region at point 'a'
(b) falling region at point 'p'
(c) common region in cutting depth of cut

따라서 a 점을 상승점(Rising point), p 점을 하강점(Falling point)이라 하면, 이 범위의 양 방향 절입깊이로 주어지는 가공조건에서는 절삭력의 상승점과 하강점사이의 공구회전각이 곧 절삭날이 a 점으로부터 p 점까지 이동하는 동안의 공구회전각이 된다. 이 공구회전각은 명백히 식(11)로 주어지는 공구회전 절면각 β 로 표현되는 각이므로 절삭력의 상승점과 하강점사이의 공구회전각을 알면 식(11)로부터 공구축방향 절입깊이 d_a 를 계산할 수 있다. 그러나 공구축방향 절입깊이 d_a 가 식(13)으로 정의되는 d_{a1} 보다 크게 되면 절삭력의 상승과 하강점사이의 공구회전각은 d_{a1} 만큼 작게 나타나므로 이를 구별할 수 있는 보완이 필요하다. 따라서 위의 과정에서 얻어지는 공구축방향 절입깊이를 \hat{d}_a 이라 하면 구하려는 실제 절입깊이는 다음 식(19)로 쓸 수 있다. 여기서 n 값의 결정을 위해서는 추가적인 정보가 필요하다.

$$d_a = \hat{d}_a + n d_{a1} \quad \text{where } n = 0 \text{ or } 1 \quad (19)$$

다시 엔드밀을 펼쳐 그린 Fig. 7에서 감지되는 공구회전 기준점으로부터 k 번째 절삭날이 a 점에 도달하기 위해 필요한 공구회전각을 α_a 라 하면, 공구절입각은 다음 식(20)으로 계산될 수 있다.

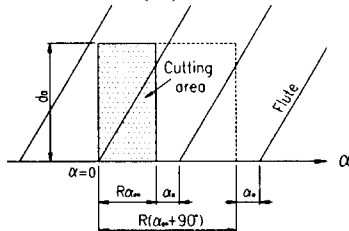


Fig. 7 Extraction of radial depth of cut

$$\hat{\alpha}_m = \text{remainder} \left\{ \left(k \frac{2\pi}{N_t} - \alpha_a \right) / \frac{2\pi}{N_t} \right\} \quad (20)$$

where $k = 1, \dots, N_t$

여기서 k 는 $0 < \hat{\alpha}_m \leq (2\pi/N_t)$ 의 조건에 의하여 결정된다. 따라서 감지되는 기준 절삭날의 하한으로부터 상승점 a 까지의 공구회전각을 알면 식(20)과 식(10)으로부터 공구회전방향 절입깊이를 구할 수 있다. 그러나 여기서도 상승점 α_a 가 $2\pi/N_t$ 의 간격을 두고 동일한 값이 얻어지므로 이 과정에서 얻어지는 공구회전방향 절입깊이를 \hat{d}_r 이라 할 때 구하고자 하는 절입깊이 d_r 은

$$d_r = \hat{d}_r + m \frac{2\pi}{N_t} \quad \text{where } m = 0 \text{ or } 1 \quad (21)$$

로 표현된다. 여기서 m 은 Fig. 8과 같이 공구절입각이 $2\pi/N_t$ 만큼 차이가 있는 두 가지 공구회전방향 절입깊이의 경우 절삭력의 방향이 크게 바뀌는 점을 이용하여 식(22)로 결정한다.

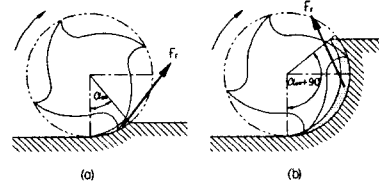


Fig. 8 Directions of the resultant cutting force according to radial depth of cut

$$m = \begin{cases} 1 & \text{if } \tan^{-1}(F_y / F_x) > \left\{ \pi/2 + w(\hat{\alpha}_m - \pi/4) \right\} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

여기서 w 는 경계부분에서의 판단을 명확히 하기 위한 가중치로 실험에서 0.2로 할 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 위의 과정으로 얻어지는 공구회전방향 절입깊이와 측정된 절삭력을 이용하면 다음 식(23)으로 주어지는 강체(Rigid) 평균절삭력 모델을 이용하여 공구축방향 절입깊이를 근사적으로 계산할 수 있다. 여기서 K 는 피삭재의 비절삭저항(Specific cutting stiffness)이다.

$$F = K f_c d_a d_r \quad (23)$$

식(23)에 의해 얻어지는 공구축방향 절입깊이를 \tilde{d}_a 라 하면 식(19)에서의 n 값은 다음 식(24)로 결정된다. 이 식은 두 값사이의 임계치만을 결정하므로 식(23)에 의해 근사적으로 얻어진 \tilde{d}_a 가 갖는 오차의 영향을 배제할 수 있다.

$$n = \begin{cases} 1 & \text{if } (\tilde{d}_o - \hat{d}_o) / d_{a1} > 0.5 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

4. 절입깊이 추정실험

Fig. 9는 공구축방향 절입깊이가 일정한 반면 공구횡방향 절입깊이가 원호를 형성하면서 변하는 경우에 대한 절입깊이 추정실험이다. 그 결과에서 구현된 알고리즘은 공구횡방향 절입깊이의 변화에 의한 영향을 적절히 배제하고 공구축방향 절입깊이를 추정함을 알 수 있다. Fig. 10은 공구횡방향 절입깊이가 일정하게 유지되는 동안 공구축방향 절입깊이가 변화하는 경우에 대한 추정실험결과이다. 일부 가공조건에서 다소 큰 오차가 발생되었지만 전체적으로 공구축방향 절입깊이의 변화를 잘 예측함을 보인다.

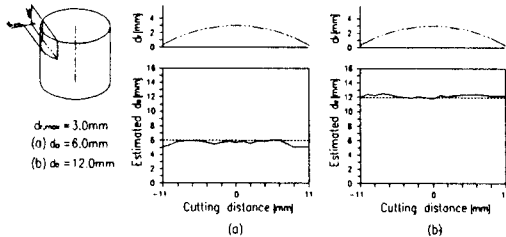


Fig. 9 Cutting depth estimation experiment for constant d_x and changing d_r

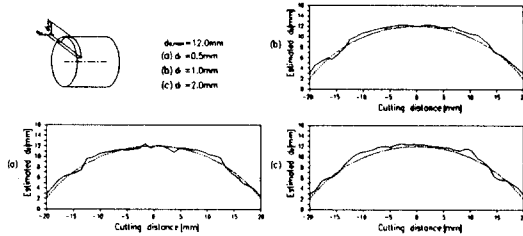


Fig. 10 Cutting depth estimation experiment for constant d_r and changing d_x

Fig. 11은 S45C 철과 Al2014-T6 알루미늄을 동일한 절입깊이로 가공할 때 발생하는 절삭력의 비교이다. 그 결과에서 피삭재 비절삭저항의 크기에 따라 절삭력의 크기는 크게 달라지나 그 변화형태에 따른 특정점의 위치는 이에 무관함을 알 수 있다. 또한 Fig. 12는 마멸된 공구와 새 공구와의 비교이다. 여기서도 마멸된 공구는 절삭력의 크기만 증가시킬 뿐 그 형태에는 별다른 영향을 주지않음을 보인다. 전개된 알고리즘이 갖는 이러한 특성은 이송

속도의 변화에 대해서도 무관하게 적용될 수 있다.

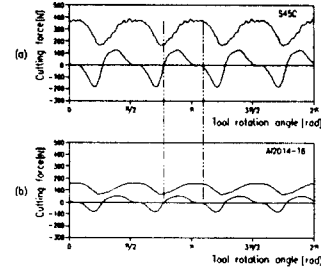


Fig. 11 Cutting depth estimation experiment for S45C steel and Al2014-T6 aluminum

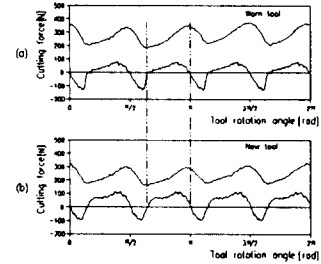


Fig. 12 Cutting depth estimation experiment for the new and the worn tool

5. 결론

본 연구를 통하여 엔드밀링의 절삭력신호로부터 절입깊이를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 피삭재 물성 및 가공조건 변화, 공구마멸 등에 영향받지 않고 효과적으로 절입깊이를 추정할 수 있도록 고안되었으며, 일차적으로 기하적응제어시스템에서 가공오차 추정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Yellowley, I., 1988, "A Note on the Significance of the Quasi-Mean Resultant Force and the Modelling of Instantaneous Torque and Forces in Peripheral Milling Operations," ASME Journal of Engineering for Industry, August, Vol. 110, pp. 300-303
- (2) Watanabe, T. and Iwai, S., 1983, "A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling," ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, September, Vol. 105, pp. 192-199
- (3) Tarn, J. H. and Tomizuka, M., 1989, "On-Line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling," ASME Journal of Engineering for Industry, August, Vol. 111, pp. 206-212
- (4) Altintas, Y. and Yellowley, I., 1987, "The Identification of Radial Width and Axial Depth of Cut in Peripheral Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 27, No. 3, pp367-387