

정면 밀링에서 절삭력을 이용한 반경 방향 절입비의 실시간 추정

황지흥*, 오영탁*, 권원태**, 주종남***

On-line Estimation of Radial Immersion Ratio in Face Milling Using Cutting Force

J. H. Hwang*, Y. T. Oh*, W. T. Kwon**, C. N. Chu***

ABSTRACT

In tool condition monitoring systems, parameters should be set to a certain threshold. In many cases, however, the threshold is dependent on cutting conditions, especially the radial immersion ratio. In this paper, presented is a method of on-line estimation of the radial immersion ratio in face milling. When a tooth finishes sweeping, a sudden drop of cutting force occurs. The force drop is equal to the cutting force that acting on a tooth at the swept angle of cut and can be acquired from cutting force signals in feed and cross-feed directions. Average cutting force per tooth period can also be calculated from cutting force signals in two directions. The ratio of cutting forces in two directions acting on a tooth at a certain swept angle of cut and the ratio of average cutting forces in two directions per tooth period are functions of the swept angle of cut and the ratio of radial to tangential cutting forces. Using these parameters, the radial immersion ratio is estimated. Various experiments are performed to verify the proposed method. The results show that the radial immersion ratio can be estimated by this method regardless of other cutting conditions.

Key Words : Face milling (정면 밀링), Radial immersion ratio (반경방향 절입비), Immersion angle (절입각), Force drop (절삭력 강하), Ratio of cutting forces (절삭력 비)

기호설명

F_T, F_R : instantaneous cutting forces on a tooth
in tangential and radial directions
 F_X, F_Y : instantaneous cutting forces on a
single tooth in X and Y directions
 F_{aX}, F_{aY} : average cutting forces in X and Y

directions
 dF_X, dF_Y : cutting force drops on a tooth in X
and Y directions at the swept angle
of disengagement
 K_s : specific cutting pressure
 s_f : feed per tooth
 r : ratio of radial to tangential cutting forces

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
** 서울시립대학교 정밀기계공학과
*** 서울대학교 기계항공공학부

- z : number of teeth
- a : axial depth of cut
- N : number of teeth involved in cutting
simultaneously
- ϕ : instantaneous angle of cut
- ϕ_s : immersion angle
- ϕ_T : tooth spacing angle

1. 서론

자동화된 생산 환경의 구축을 위해서 숙련된 작업자를 대신하여 공작기계의 작업 상태를 감시하고 진단할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다. 특히 공구 파손은 공작물과 기계에 치명적인 손상을 초래하고 기계 정지 시간을 증가시키므로 이에 대한 감시는 필수적이다. 공구파손을 감시할 때 공구상태를 파손으로 결정하는 판단기준이 되는 것이 임계값(threshold)이다. 임계값이란 감시하려는 파라미터 값이 그 이상 커지면 이상상태로 판단하게 되는 크기로서 많은 경우에 절삭조건에 대한 함수이다. 절삭조건에 무관한 파라미터에 관한 연구가 많이 수행되어, 속도, 절삭깊이, 이송속도 등의 절삭조건에 무관하게 공구상태를 감시할 수 있는 파라미터들이 제안되었다^(1, 2). 그러나 정면밀링가공 실험에서 얻어진 이 파라미터의 임계값들도 공구 반경 방향 절입비의 함수이므로 공구파손 감시를 위해 공구반경 방향 절입비의 예측은 필수적이다.

절삭 가공 중 절삭 조건의 변화를 검출하는 연구들은 지속적으로 행해졌다. Altintas와 Yellowley는 반경 방향 절입비를 이송 방향과 이송에 수직한 방향의 날당 평균 절삭력 차와 날 당 준평균 절삭합력의 비에 대한 다항식으로 나타냄으로써 반경 방향 절입비를 추정하였다⁽¹⁾. 이 방법의 경우 미리 시험 절삭을 통해 각각의 날당 이송량에 따른 다항식의 계수를 구해야 한다. 또한 Altintas와 Yellowley는 순간적인 절삭 합력의 평균 제곱값과 날 당 준평균 절삭 합력의 비로부터 반경 방향 절입비를 추정하였는데⁽²⁾ 이 경우 추정 인자의 값이 절입비에 대해 지수적으로 감소하므로 절입비가 클 때 효과적으로 추정해 낼 수 없다. Tarn과 Tomizuka는 절삭날이 절삭에 참여하는 시간을 이용하여 반경 방향 절입비를 구하였다⁽³⁾. 이 방법은 2날 이상이 동시에 절삭에 참여하는 경우 절입비를 제대로

추정하지 못한다. 최 종근, 양 민양은 절삭력 신호의 변화 양상을 추적하여 반경 방향 절입비와 축방향 절입 깊이를 추정하였고⁽⁴⁾. 이 성일은 절삭력 신호의 2차 보간 및 절삭시간 간격을 이용하여 두 날 이상이 동시에 절삭에 참여할 때도 반경 방향 절입비를 추정하였다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 정면 밀링에서 반경 방향 절입비를 효과적으로 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 절삭력 신호로부터 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 절삭력을 이송 방향과 이송에 수직한 방향에 대해 분리하였고 분리된 두 절삭력 성분의 비와 두 개의 날당 평균 절삭력 비가 절입각과 접선 방향 절삭력에 대한 반경 방향 절삭력 비의 함수임을 이용하여 반경 방향 절입비를 추정하였다. 절삭 실험은 축 방향 절입 깊이, 공구 직경, 절삭 속도, 날 수 등의 절삭 조건을 변화시키면서 수행하여 제시된 방법의 타당성을 증명하였다.

2. 반경 방향 절입비 추정 알고리즘

2.1 반경 방향 절입비 추정식

접선 방향의 절삭력 F_T 와 반경 방향 절삭력 F_R 은 순간적인 미절삭 면적 $as_i \sin \phi$, 비절삭압력 K_s , 그리고 F_T 와 F_R 의 비 r 로 나타난다⁽⁶⁾.

$$F_T = K_s a s_i \sin \phi \tag{1}$$

$$\begin{aligned} F_R &= r F_T \\ &= r K_s a s_i \sin \phi \end{aligned} \tag{2}$$

절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 X, Y 방향 절삭력을 나타내면 다음과 같다⁽²⁾.

$$\begin{aligned} F_X(\phi_s) &= F_T \cos \phi_s + F_R \sin \phi_s \\ &= K_s a s_i \sin \phi_s \cos \phi_s \\ &\quad + r K_s a s_i \sin \phi_s \sin \phi_s \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} F_Y(\phi_s) &= F_R \cos \phi_s - F_T \sin \phi_s \\ &= r K_s a s_i \sin \phi_s \cos \phi_s \\ &\quad - K_s a s_i \sin \phi_s \sin \phi_s \end{aligned} \tag{4}$$

절삭력 성분 F_X 와 F_Y 는 절삭 깊이나 이송량 등

의 절삭 조건에 대한 함수이다. 두 절삭력 성분의 비를 구하면 이 값은 접선 방향 절삭력에 대한 반경 방향 절삭력 비 r 과 절입각 ϕ_s 의 함수이다.

$$\frac{F_Y(\phi_s)}{F_X(\phi_s)} = \frac{r - \tan \phi_s}{1 + r \tan \phi_s} \quad (5)$$

식 (5)를 ϕ_s 에 관해 정리하면 다음과 같이 두 절삭력 성분의 비와 r 의 함수가 된다.

$$\phi_s = \tan^{-1} \frac{r - \frac{F_Y(\phi_s)}{F_X(\phi_s)}}{1 + r \frac{F_Y(\phi_s)}{F_X(\phi_s)}} \quad (6)$$

식 (5)에서 두 절삭력 성분의 비와 절입각과의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 1과 같다.

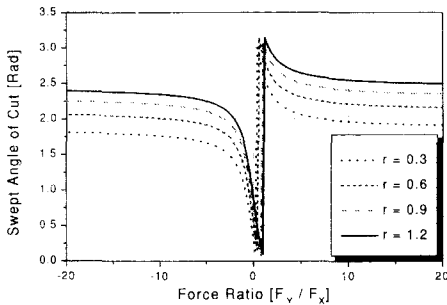


Fig. 1 Relationship between the immersion angle (ϕ_s) and the ratio of cutting forces ($-F_Y/F_X$) on a tooth at immersion angle

그림에서 두 절삭력 성분의 비가 같을 때는 r 의 값이 클수록 절입비가 크다. 또한 동일한 r 값에 대해서는 두 절삭력 성분의 비가 클수록 절입각 ϕ_s 도 크다. 절입비의 추정을 위해 사용된 또 다른 요소는 날당 평균 절삭력으로 X와 Y 방향의 날당 평균 절삭력은 식 (7)과 (8)로 표현된다.

$$F_{ax}(\phi_s) = \frac{1}{\phi_T} \int_0^{\phi_s} F_X(\phi) d\phi$$

$$= \frac{K_s a s_t z}{8\pi} [(1 - \cos(2\phi_s)) + r(2\phi_s - \sin(2\phi_s))] \quad (7)$$

$$F_{ay}(\phi_s) = \frac{1}{\phi_T} \int_0^{\phi_s} F_Y(\phi) d\phi = \frac{K_s a s_t z}{8\pi} [r(1 - \cos(2\phi_s)) - (2\phi_s - \sin(2\phi_s))]$$

여기서 $\phi_T = \frac{2\pi}{z}$ (8)

F_{ax} 와 F_{ay} 의 비는 식 (9)와 같이 ϕ_s 와 r 만의 함수가 되며 이를 r 에 대해 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{F_{ay}(\phi_s)}{F_{ax}(\phi_s)} = \frac{r(1 - \cos(2\phi_s)) - (2\phi_s - \sin(2\phi_s))}{(1 - \cos(2\phi_s)) + r(2\phi_s - \sin(2\phi_s))} \quad (9)$$

$$r = \frac{(2\phi_s - \sin(2\phi_s)) + \frac{F_{ay}(\phi_s)}{F_{ax}(\phi_s)}(1 - \cos(2\phi_s))}{(1 - \cos(2\phi_s)) - \frac{F_{ay}(\phi_s)}{F_{ax}(\phi_s)}(2\phi_s - \sin(2\phi_s))} \quad (10)$$

식 (10)의 두 평균 절삭력 성분의 비와 절입각과의 관계를 그래프로 나타낸 Fig. 2에서 보듯이 두 평균 절삭력 성분의 비가 같을 때에는 r 값이 클수록 절입비가 크다. 동일한 r 값에 대해서는 평균 절삭력의 비가 클수록 절입각이 작다. 식 (6)과 (10)은 각각 ϕ_s 와 r 의 함수이지만 해석적으로 풀리지 않으므로 다음과 같이 수치해석적인 방법을 사용한다. 먼저 0과 1사이의 임의의 값을 r 의 초기값으로 설정한 후 식(6)을 이용하여 절입각을 추정한다. 이때 임의로 정한 r 값이 실제의 값보다 작을 경우에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 절입각이 실제보다 작게 추정되고 r 값이 실제의 값보다 클 경우에는 절입각이 크게 추정된다. 이 절입각을 식 (10)에 대입하여 다시 r 값을 구하는데 이 때 만약 처음에 설정된 r 값이 실제의 값보다 작은 경우에는 Fig. 2에서 보는 것처럼 처음 설정된 값보다는 크고 실제의 값보다는 작은 r 값이 구해진다. 또한 처음에 설정된 r 값이 실제의 값보다 큰 경우에는 처음에 설정된 값보다는 작고 실제의 값보다는 큰 r 값이 구해진다. 따라서 이 값을 다시 r 의 초기값으로 하여 앞에서 기술한 과정을 반복하면 r 값은 실제 r 값에 수렴하게 되고 결과적으로 정확한 r 값과 절입각을 구

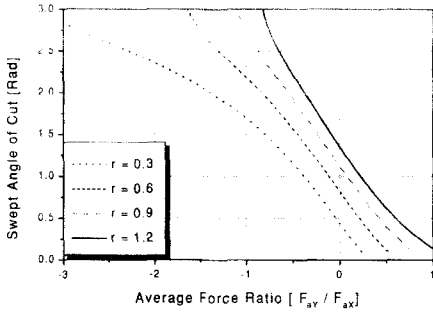


Fig. 2 Relationship between the ratio of the average forces (F_{ay}/F_{ax}) and the swept angle of cut(ϕ_s)

할 수 있다.

2.2 절삭력비와 절입각의 수렴 여부

앞절의 반경 방향 절입비를 구하는 알고리즘에서 식 (6)에 의해 계산된 절입각을 식 (10)에 대입하여 얻은 r값은 그 전에 식 (6)에 주어진 r값과 실제의 r값 사이의 값을 갖는다고 가정하였다. 만약 이러한 가정이 성립하지 않는다면 반복된 계산에 의해 구해지는 r값과 절입각은 실제의 r값과 절입각에 수렴하지 않으므로 이 가정의 타당성을 검증하여야 한다. 식 (6)과 식 (10)에서 r에 대한 절입각 ϕ_s 의 변화율은 각각 식(11)과 (12)와 같다.

$$\frac{d\phi_s}{dr} = \frac{1}{1+r^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_s}{dr} = & \{-1 - 4\phi_s^2 + 2\cos(2\phi_s) + 2\cos^2(2\phi_s) \\ & + 4\phi_s\sin(2\phi_s) - \sin^2(2\phi_s)\} / \{2(1+r^2) \\ & \cdot [(1 - \cos(2\phi_s))^2(2\phi_s + \sin(2\phi_s))]\} \quad (12) \end{aligned}$$

Fig. 3은 식 (12)와 식 (11)의 차이를 ϕ_s 와 r에 대하여 그린 것인데 그 값이 항상 양이다. 이는 식 (6)에서 r의 변화에 따른 절입각 ϕ_s 의 변화가 식 (10)에서 r의 변화에 따른 절입각 ϕ_s 의 변화보다 작다는 것을 의미한다. 따라서 식 (6)에서 구한 절입각을 식 (10)에 대입하면 이 때의 r값은 식 (6)에 대입한 r값과 실제의 r값 사이의 값을 가지게 되고

이 과정을 반복하면 추정된 절입각과 r값은 실제의 절입각과 r값에 수렴한다. 따라서 앞의 가정이 타당함을 알 수 있다.

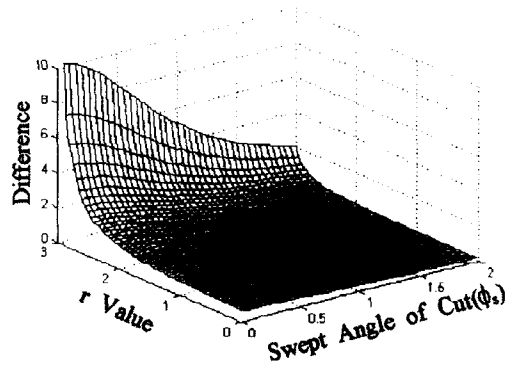


Fig. 3 Difference between derivatives of immersion angles calculated from average cutting forces and from instant cutting forces at the swept angle

2.3 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 절삭력의 분리

식 (6)과 식 (10)을 이용하여 절입각을 추정하기 위해서는 절삭을 끝마치는 날의 절입각에서의 절삭력 성분을 알아야 한다. 측정된 X, Y 방향의 절삭력으로부터 절삭을 끝마치는 날이 절입각에서 받는 절삭력 성분을 분리해내는 과정을 아래에 설명하였다.

2.3.1 한 날만이 절삭에 참여하는 경우

Fig. 4는 6개의 날을 가진 정면 밀링에서 한 날만이 절삭에 참여하는 경우 공구 1회전 동안의 절삭력 시뮬레이션 값이다. 그림에서 한 날만이 절삭에 참여할 때는 절삭력이 0에서부터 서서히 증가하다가 절삭을 끝마칠 때는 절삭력이 0으로 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이 불연속점에서의 절삭력을 분리함으로써 절입각에서의 절삭력 성분을 구한다. 따라서 한날만 절삭을 할 경우 절삭력의 불연속에서 한 날에 걸리는 절삭력 dF_x , dF_y 는 절입각에서 절삭날에 걸리는 절삭력과 같다.

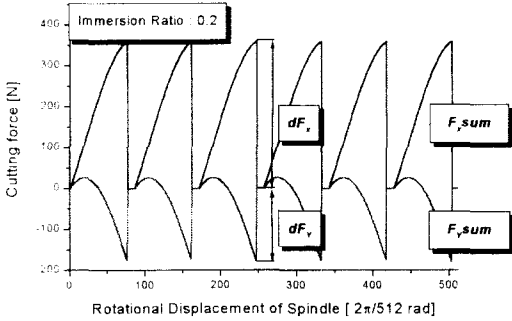


Fig. 4 Simulated cutting forces when one tooth participates in cutting

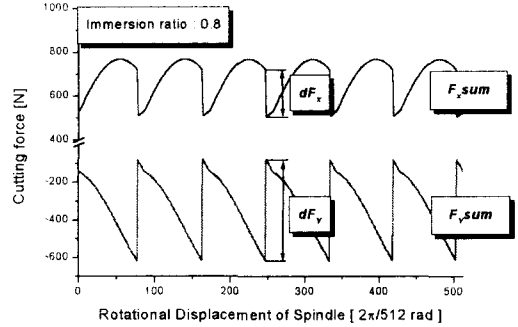


Fig. 5 Simulated cutting forces when two teeth participate in cutting

$$dF_X = F_X(\phi_s) \quad (13)$$

$$dF_Y = F_Y(\phi_s) \quad (14)$$

2.3.2 두 날 이상이 절삭에 참여하는 경우

Fig. 5는 6개의 날을 가진 정면 밀링에서 두 날 이상이 동시에 절삭하는 경우 공구 1회전 동안의 절삭력을 성분에 따라 시뮬레이션한 결과이다. 이때 임의의 공구 위치에서의 절삭력 성분은 각 날들의 절삭력 성분들이 중첩된다. 그러나 절삭날이 절삭을 끝마칠 때는 절삭력 성분에 불연속이 발생하며 이 불연속 전후에서의 절삭력 성분의 차이값은 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 절삭력의 크기와 같다.

$$\begin{aligned} dF_X &= \sum_{k=1}^N F_X[\phi_s - (k-1)\phi_T] \\ &\quad - \sum_{k=2}^N F_X[\phi_s - (k-1)\phi_T] \\ &= F_X(\phi_s) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} dF_Y &= \sum_{k=1}^N F_Y[\phi_s - (k-1)\phi_T] \\ &\quad - \sum_{k=2}^N F_Y[\phi_s - (k-1)\phi_T] \\ &= F_Y(\phi_s) \end{aligned} \quad (16)$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

실험장치 전체의 구성은 Fig. 6과 같다.

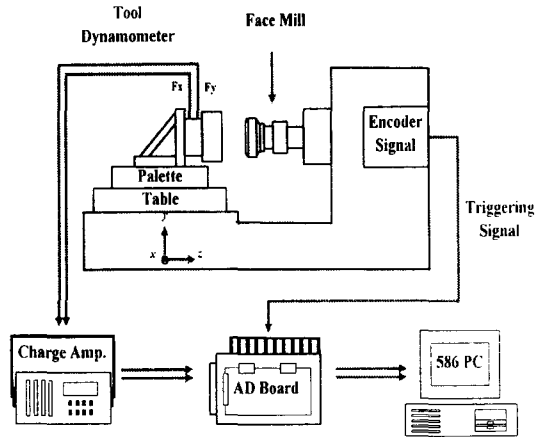


Fig. 6 Schematics of experimental setup

공작기계는 대우중공업(주)에서 제작한 ACE-H40 수평형 머시닝 센터를 사용하였고, 절삭력은 Kistler Type 9257B 공구동력계로 측정하였다. 공구동력계로터 나오는 신호를 이송 방향과 이송에 수직인 방향으로 나누기 위하여 절삭력 분배기(distributor)가 쓰였으며 분배된 신호를 증폭시키기 위하여 Kistler Type 5011 전하 증폭기(charge amplifier)가 사용되었다. 절삭력 신호에 포함되어 있는 잡음은 전하 증폭기내에 내장된 300Hz 저주

과 내역 통과 필터(low pass filter)를 통해 제거하였다. 신호 처리를 위해서는 Real Time Device사의 A/D 2210 신호 처리용 보드와 586 Pentium PC를 사용하였다. 또한 공구가 일정한 각도를 회전할 때마다 동일한 수의 데이터를 얻기 위하여 1회전 당 512개씩 발생하는 엔코더 신호를 A/D 트리거(trigger) 신호로 이용하였다. 공작물은 일반 구조용 탄소강 SM45C를, 공구로는 직경 100 mm의 정면 밀링 커터를 사용하였다. 정면 밀링 커터에 삽입된 팁은 일반 탄소강 절삭에 쓰이는 대한 중석(주)의 SPKN1203EDR KT700이다.

3.2 실험 결과

3.2.1 평균 절삭력 비와 절입각에서의 절삭력비의 관계

앞에서 제시된 반경 방향 절입비 추정 알고리즘은 임의의 공구 회전각에서 접선 방향 절삭력에 대한 반경 방향 절삭력의 비(r)가 항상 일정하다고 가정하였다. 그러나 이 값은 미절삭 칩두께의 함수이므로 식 (6)과 (10)에서의 r 값은 크기가 서로 다르다. 즉 식 (6)에서의 r 값은 절입각에서의 크기이고 식 (10)에서의 r 값은 평균값이다. 그러므로 각 절입비에서 순간 r 값과 평균 r 값의 관계를 구해야한다. 실험적으로 구해진 이 관계가 Fig. 7에 주어지는데 이는 선형으로 근사화된다.

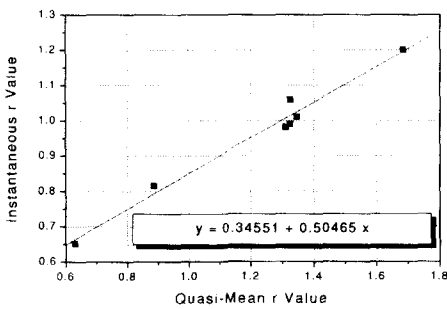


Fig. 7 Relationship between quasi-mean and instantaneous r value at the swept angle of cut

Fig. 7에서 구해진 관계식을 반경 방향 절입비 추정 알고리즘에 추가하면 Fig. 8과 같은 순서도가 완성된다.

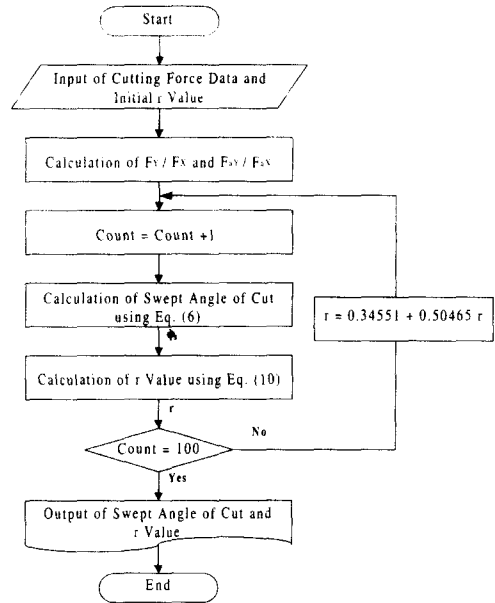


Fig. 8 Flowchart of the algorithm for estimation of radial immersion ratio

3.2.2 반경방향 절입비 추정 결과

실험은 주축의 회전 속도와 축방향 절입 깊이, 공구 반경, 날 수, 날당 이송, 시편의 재료를 변화시키면서 수행하였는데 Table 1은 실험에 사용된 절삭 조건을 나타낸다. Fig. 9부터 Fig. 14는 절삭 조건을 변화시키면서 반경방향 절입비를 추정한 결과이다.

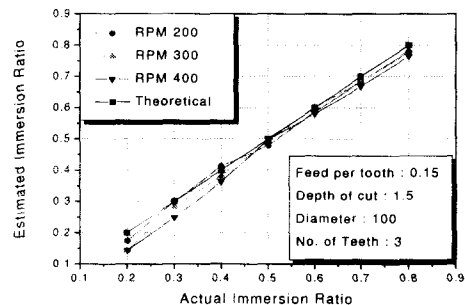


Fig. 9 Estimation of immersion ratio according to spindle speed

주축의 회전 속도와 축방향 절입 깊이, 공구 반

경, 날 수, 날당 이송, 시편 재료가 변하더라도 절입 비를 잘 추정하고 있다. Fig. 15는 반경 방향 절입 비를 연속적으로 변화시키면서 실험한 결과를 나타 낸 것이다. 반경 방향 절입비가 연속적으로 변하더라도 제시된 알고리 즘은 이를 잘 추정하였다.

Table 1 List of cutting condition

	Spindle Speed (RPM)	Cutter Diameter (mm)	Feed per Tooth (mm/tooth)	No. of Teeth	Axial Depth of Cut (mm)	Material
Cutting force variation	200	100	0.15	3	1.5	SM45C
	300	100	0.15	3	1.5	SM45C
	400	100	0.15	3	1.5	SM45C
Depth of cut variation	300	100	0.15	3	1	SM45C
	300	100	0.15	3	1.5	SM45C
	300	100	0.15	3	2	SM45C
Cutter diameter variation	300	50	0.15	3	1.5	SM45C
	300	100	0.15	3	1.5	SM45C
No. of teeth variation	200	100	0.15	2	1	SM45C
	200	100	0.15	3	1	SM45C
	200	100	0.15	6	1	SM45C
Feed/tooth variation	300	100	0.1	3	1.5	SM45C
	300	100	0.15	3	1.5	SM45C
	300	100	0.2	3	1.5	SM45C
Workmaterial variation	300	100	0.15	3	1.5	SM45Q
	300	100	0.15	3	1.5	Al
Continuously varying immersion ratio	200	100	0.15	6	1	SM45C

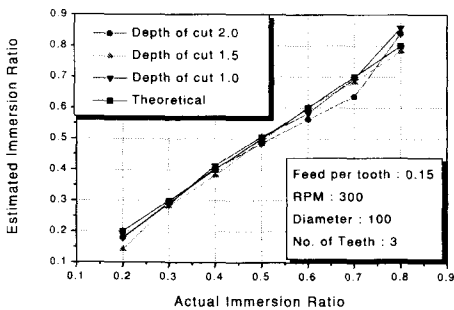


Fig. 10 Estimation of immersion ratio according to axial depth of cut

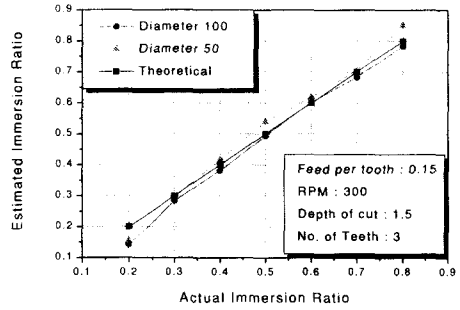


Fig. 11 Estimation of immersion ratio according to cutter diameter

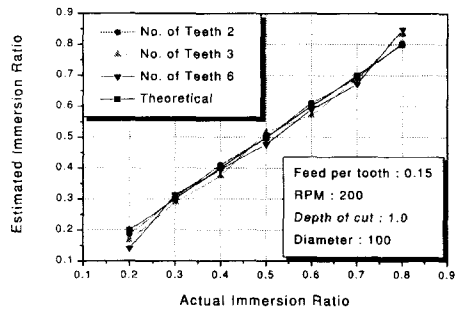


Fig. 12 Estimation of immersion ratio according to number of teeth

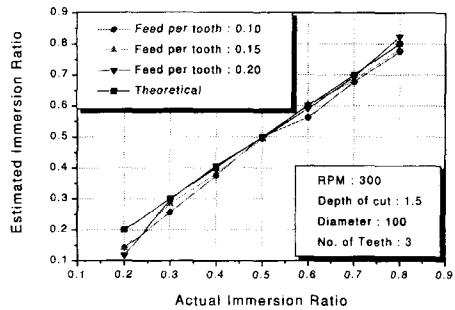


Fig. 13 Estimation of immersion ratio according to feed per tooth

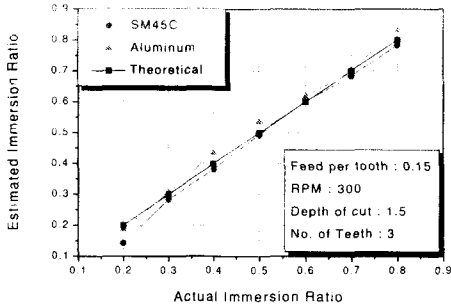
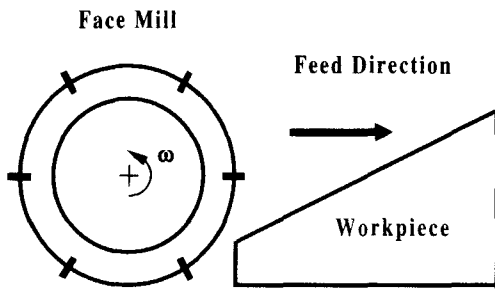
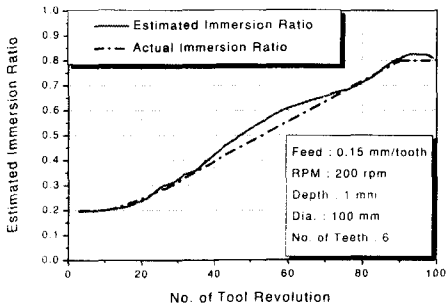


Fig. 14 Estimation of immersion ratio according to material



(a) Geometry of workpiece



(b) Estimation of immersion ratio

Fig. 15 Geometry of workpiece and estimation of continuously varying immersion ratio

4. 결론

- (1) 한 절삭날이 절삭을 끝마치는 순간에 나타나는 절삭력의 불연속으로부터 절입각에서 그 날에 걸리는 절삭력 성분을 분리하고 분리된 절삭력 성분의 비를 절입각과 접선 방향 절삭력에 대한 반경 방향 절삭력 비의 함수로 나타낼 수 있다.
- (2) 이송 방향과 그에 수직한 방향에 대해 날당 평균 절삭력을 구하고 두 성분의 비를 절입각과 접선 방향 절삭력에 대한 반경 방향 절삭력 비의 함수로 나타낼 수 있다.
- (3) 절입각에서의 절삭 성분의 비와 날당 평균력의 비를 이용한 반복 계산에 의해 절입비와 접선 방향 절삭력에 대한 반경 방향 절삭력 비를 실시간으로 구할 수 있다.
- (4) 제시된 알고리즘은 한 날은 물론 두 날 이상이 동시에 절삭하는 경우에 있어서도 반경방향 절입비를 잘 추정하였다.

참고문헌

1. Altintas, Y., Yellowley, I., "The Identification of Radial Width and Axial Depth of Cut in Peripheral Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 27, pp. 367-381, 1987.
2. Altintas, Y., Yellowley, I., "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models," ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 111, pp. 149-157, 1989.
3. Tarn, J. H., Tomizuka, M., "On-line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling," ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 111, pp. 206-212, 1989.
4. 최중근, 양민양, "절삭력을 이용한 엔드밀링 절입깊이 추정," 한국정밀공학회 97년도 춘계 학술대회논문집, pp. 1033-1037, 1997.
5. 이성일, "정면밀링에서의 반경방향 절입비 추정," 서울대학교 기계설계학과 공학석사 학위논문, 1998.
6. Martellotti, M. E., "Analysis of the Milling Process," ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 63, pp. 667-674, 1941.