

정면밀링에서 절삭력을 이용한 절입비와 절삭력비의 실시간 추정

김명곤*, 권원태**

On-line Simultaneous Identification of Immersion Ratio and Cutting Force Ratio using Cutting Forces in Face Milling

M. K. Kim*, W. T. Kwon**

Abstract

In this paper, presented is a method of on-line estimation of the radial immersion ratio and cutting force ratio using cutting force. When a tooth finishes sweeping, sudden drop of cutting forces occurs. These force drops are equal to the cutting forces that act on a single tooth at the swept angle of cut and can be obtained from cutting force signals in feed and cross-feed directions. The ratio of cutting forces in feed and cross-feed directions acting on the single tooth at the swept angle of cut is a function of the swept angle of cut and the ratio of radial to tangential cutting force. In the research, it is found that the ratio of radial to tangential cutting force is not affected by cutting conditions and axial rake angle. Therefore, the ratio of radial to tangential cutting force determined by just one preliminary experiment can be used regardless of the cutting conditions. Using the measured cutting forces, the radial immersion ratio is estimated along with the cutting force ratio at that immersion angle. Various experiments show that the radial immersion ratio and instantaneous ratio of the radial to tangential direction cutting force can be estimated by the proposed method very well.

Key Words : radial immersion ratio(반경방향 절입비), mstantaneous ratio of the radial to tangential direction cutting force(반경방향과 접선방향의 절삭력비), face milling(정면밀링)

1. 서론

생산 공정의 자동화를 위하여, 절삭 공정의 적응 제어를 위한 가공기하의 실시간 인식이나 절삭 상태의 탄력적 감시를 위한 절삭조건에 실시간 감시 할 수 있는 시스템이 개발이 필요하다. 이 시스템이 제대로 작동하기 위해서는

이상 현상과 절삭 조건의 변화를 구분할 수 있어야 한다. 이러한 이상 현상 검출을 위해서는 임계값(threshold)의 설정이 중요하다. 정면밀링에서 임계값은 공구반경방향 절입비의 함수이므로 공구 이상 상태 감시를 위한 공구 반경방향 절입비의 예측은 필수적이다.

절삭가공 중 공구의 상태를 감시하는 연구들은 지속적

* 서울시립대학교 정밀기계공학과 대학원
** 서울시립대학교 정밀기계공학과

으로 수행되어져왔다. Altintas⁽¹⁾ 등은 절입비를 날당 평균 절삭력 성분의 차와 날당 준평균 절삭합력의 비에 대한 다항식으로 나타냄으로써 반경 방향 절입비를 추정하였다. 이 경우는 미리 예비 절삭을 통해 각각의 날당 이송량에 따른 다항식의 계수를 구해야 하는 단점이 있다. 또한 Altintas⁽²⁾ 등은 순간적인 절삭 합력의 평균 제곱값과 날당 준평균 절삭합력의 비로부터 반경방향 절입비를 추정하였다. 이 경우는 추정되는 값이 절입비에 대해 지수적으로 감소하므로 절입비가 클 때 효과적으로 추정할 수 없다. Tam⁽³⁾ 등은 절삭날이 절삭에 참여하는 시간을 이용하여 반경방향 절입비를 구하였다. 이 방법은 2날 이상이 동시에 절삭에 참여하는 경우 절입비를 제대로 추정하지 못하는 단점이 있다. 최종근⁽⁴⁾ 등은 엔드밀링 중 절삭력 신호의 변화 양상을 추적하여 반경방향 절입비와 축방향 절입깊이를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 이 성일⁽⁵⁾ 은 절삭력 신호의 2차보간을 이용하여 두 날 이상이 동시에 절삭에 참여할 때도 반경 방향 절입비를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 황지홍⁽⁶⁾ 등은 절입각에서의 절삭 성분의 비와 날당 평균 절삭력의 비를 이용하여 반복 계산에 의해 절입비와 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력의 비를 실시간으로 구하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 정면밀링에서 반경방향 절입비를 효과적으로 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 절삭력 신호로부터 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 순간 절삭력을 이송방향과 이송방향에 수직인 방향의 절삭력으로 분리하고 분리된 두 절삭력의 성분의 비가 절입각과 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비의 함수이므로 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비를 미리 시험 절삭을 통해 예측하여 반경 방향 절입비를 추정하였다. 절삭 실험을 축방향 절입깊이, 절삭 속도, 날당 이송 등의 절삭 조건과 공구의 경사각을 변화시키면서 외날 절삭을 수행하였고 절입비를 변화시키면서 다날 절삭을 수행하여 제시된 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 절삭력 모델링 및 반경방향 절입비 추정 알고리즘

2.1 절삭력 모델링

정면 밀링에서 절삭력의 경로를 원호로 가정하면 공구 회전각 ϕ 에서의 접선방향 절삭력 $F_T(\phi)$ 와 반경방향 절삭력 $F_R(\phi)$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$\begin{aligned} F_T(\phi) &= K_T a h(\phi) \\ &= K_T a S_f \sin \phi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_R(\phi) &= r(h(\phi)) F_T \\ &= r(h(\phi)) K_T a S_f \sin \phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 K_T 는 비절삭저항, a 는 절삭깊이, S_f 는 이송 속도, ϕ 는 절입각을 나타낸다.

이때 이송방향(X 방향)과 이송방향의 수직방향(Y 방향)의 절삭력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_X(\phi) &= F_T \cos \phi + F_R \sin \phi \\ &= K_T a S_f \sin \phi \cos \phi + r(h(\phi)) K_T a S_f \sin^2 \phi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_Y(\phi) &= F_R \cos \phi - F_T \sin \phi \\ &= r(h(\phi)) K_T a S_f \sin \phi \cos \phi - K_T a S_f \sin^2 \phi \end{aligned} \quad (4)$$

절삭력 성분 F_X 와 F_Y 는 절삭 깊이와 날당 이송량 등의 절삭조건에 대한 함수이다. 두 절삭력 성분의 비를 구하면 절삭조건에 상관없고 절입각과 접선방향에 대한 반경방향 절삭력 비 $r(h(\phi))$ 과 절삭하고 있는 날의 위치를 나타내는 공구 회전각 ϕ 만의 함수가 된다.⁽⁶⁾

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

2.2 절입각에서의 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 절삭력의 분리

절삭날이 공작물을 빠져나가면서 절삭력이 떨어지는 불연속점에서의 절삭력은 절삭날이 절입각에 도달했을때의 절삭력 성분들은 다음 식으로 나타낸다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} dF_X(\phi_s) &= \sum_{i=1}^N F_{X_i}(\phi_s - (i-1)\phi_T) \\ &\quad - \sum_{i=2}^N F_{X_i}(\phi_s - (i-1)\phi_T) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} dF_Y(\phi_s) &= \sum_{i=1}^N F_{Y_i}(\phi_s - (i-1)\phi_T) \\ &\quad - \sum_{i=2}^N F_{Y_i}(\phi_s - (i-1)\phi_T) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 N = 절삭 날수, $\phi_T = 2\pi/N$

절입각에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dF_Y}{dF_X} = \frac{r(h(\phi_s)) - \tan(\phi_s)}{1 + r(h(\phi_s))\tan(\phi_s)} \quad (8)$$

$$\phi_s = \tan^{-1} \frac{r(h(\phi_s)) - dF_Y / dF_X}{r(h(\phi_s)) \cdot dF_Y / dF_X + 1} \quad (9)$$

이때 r 값 알면 2날 이상의 절삭날이 동시에 절삭에 참여하는 경우에도 절삭력의 불연속점을 전후로 한 절삭력 차이 값의 비를 이용하여 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비의 예측이 가능하다. r 값도 ϕ 에 대한 함수로 실험적으로 얻어진다.

2.3 칩로드 변화에 따른 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력의 비의 변화

반경방향 절입비 추정식(식 (9))에서 임의의 공구 회전각에서 접선 방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력의 비 r 은 미절삭 칩두께에 따라 달라지는데 이를 Fig. 1과 같이 실험을 통해서 구하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 온절삭(full immersion cutting)에서의 순간 r 값은 절입각이 90° 보다 작을 때는 지수적으로 감소하고 있으며 전체적으로는 90° 를 기준으로 대칭 형태를 보이고 있다.

이러한 사실을 바탕으로 다음 식으로 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} r &= b_1 e^{b_2 h(\phi_s)} + b_3 \\ &= b_1 e^{b_2 b_3 \sin \phi_s} + b_3 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 b_1, b_2, b_3 는 상수이다.

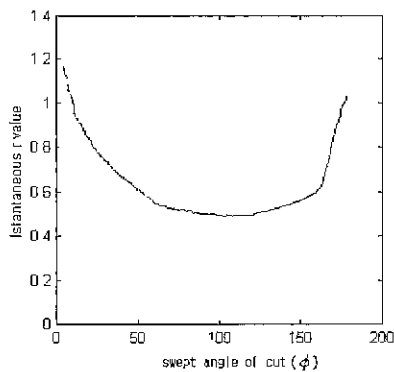


Fig. 1 Instantaneous r value at the swept angle of cut (1 tooth, feed per tooth 0.2mm/tooth, spindle speed 600rpm, axial depth of cut 2.0mm)

절입각을 구하는 알고리즘은 절삭날이 공작물을 빠져나 가면서 절삭력이 떨어지는 불연속점에서의 절삭력 성분의 비를 식 (9)에 대입하여 절입각 ϕ_s 를 구한다. 이때 초기 r 값은 1로 시작한다. 계산결과 얻어진 절입각을 식 (10)에 대입하여 다음 r 값을 구하고 이 값을 (9)에 대입하여 다시 ϕ_s 를 구한다. 이 과정을 반복적으로 수행하여 ϕ_s 가 특정값에 수렴하면 이 값을 절입각으로 결정한다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치

절삭력 측정을 위하여 Kistler사의 9257B 공구동력계를 사용하였고, 측정된 절삭력은 HS-DAS 12 보드를 통해 A/D변환한 후 586PC에 저장하였다.

외날 절삭 시에 공구의 리드각(leading angle)은 45° 로 고정되었고 Table 3, 4에서처럼 반경방향 경사각과 축방향 경사각은 변화되는 M545SE05R-12B 커터를 사용하였으며 절삭 조건에 따른 절삭력 실험에는 대한중석 SEKN1203AFN P25 인서트를 사용하였고 시편은 Al6061 T6를 사용하였다. 다날 절삭 시는 공구의 리드각 45° , 축방향 경사각 12° , 반경방향 경사각 7° 인 M345 SNP0R-15B 커터를 사용하였으며 인서트는 SDK N53MT KT750-10을 사용하였고 시편은 SM45C를 사용

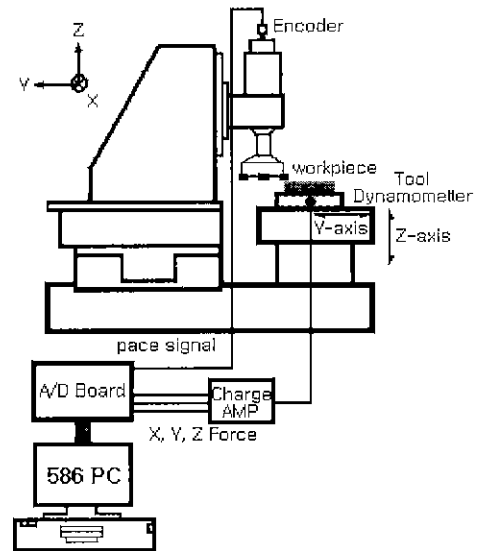


Fig. 2 Experimental set up

Table 1 Cutting conditions for 1 tooth machining

	Cutter diameter (mm)	Spindle speed (RPM)	Axial depth of cut (mm)	Feed per tooth (mm/tooth)
Variation of the depth of cut	125	600	1.5	0.20
	125	600	2.0	0.20
	125	600	3.0	0.20
Variation of the spindle speed	125	540	2.0	0.20
	125	600	2.0	0.20
	125	720	2.0	0.20
Variation of the feed per tooth	125	780	2.0	0.20
	125	600	2.0	0.10
	125	600	2.0	0.12
	125	600	2.0	0.14
	125	600	2.0	0.16
	125	600	2.0	0.18
	125	600	2.0	0.20

Table 2 Cutting conditions for multi teeth machining

	Cutter diameter (mm)	Spindle speed (RPM)	Axial depth of cut (mm)	Feed per tooth (mm/tooth)	
varying immersion ratio	Variation of the depth of cut	100	600	1.5	0.20
		100	600	2.0	0.20
		100	600	3.0	0.20
	Variation of the spindle speed	100	540	2.0	0.20
		100	600	2.0	0.20
		100	720	2.0	0.20
	Variation of the feed per tooth	100	780	2.0	0.20
		100	600	1.0	0.06
		100	600	1.0	0.08
100		600	1.0	0.10	
	100	600	1.0	0.112	

Table 3 Variation of radial rake angle

Axial Rake angle	20°					
Radial Rake Angle	0°	-2°	-4°	-6°	-8°	-10°

Table 4 Variation of axial rake angle

Radial Rake angle	-6°					
Axial Rake Angle	10°	12°	14°	16°	18°	20°

하였다. 인서트는 각각 커터에 합당한 것으로 장착하였기 때문에 외날 절삭과 다날 절삭시 다른 인서트가 사용되었다.

3.2 순간 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력의 비

이 절에서는 r 값이 절삭조건에 따라 어떻게 바뀌는지 살펴보았다. 실험 조건은 Table 1에 주어졌다. Fig. 3, 4, 5는 각각 날당이송, 축방향 절삭깊이, 주축의 회전속도를 변화시키면서 알루미늄 합금을 절삭할 때 순간 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비율 구한 실험 결과이다.

이 그림에서 위의 3가지 절삭조건이 변화여도 순간 r 값은 크게 변하지 않았다. 따라서 순간 r 값은 절삭조건에 의해 변화하지 않으며 가정과 같이 순간 칩두께만의 함수임을 확인하였다.

공구의 반경방향 경사각과 축방향 경사각의 변화가 순간 r 값에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 3, Table 4와 같이 공구 경사각이 변할 때 순간 r 값을 구하는 실험

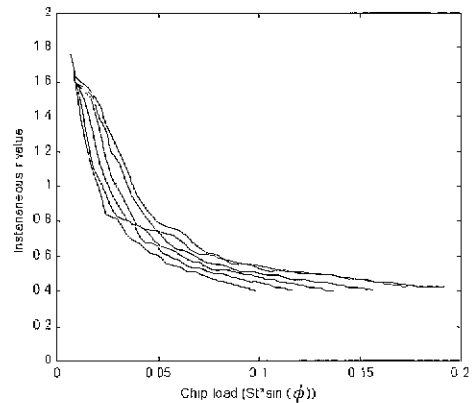


Fig. 3 Instantaneous r value with various feedper tooth (feed/tooth 0.1, 0.12, value with various feedper tooth (feed/tooth 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2 mm/tooth, spindle speed 600rpm, axial depth of cut 1.0 mm))

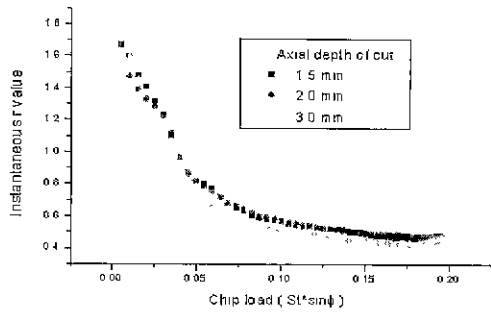


Fig. 4 Instantaneous r value with various axial depth of cut

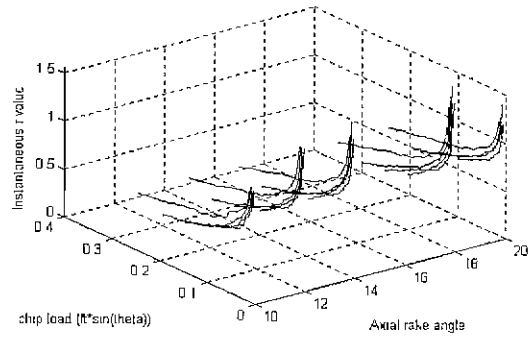


Fig. 7 Instantaneous r value with various axial rake angle

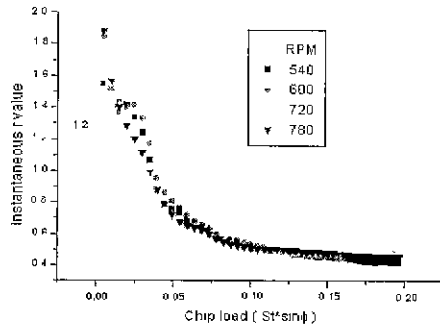


Fig. 5 Instantaneous r value with various spindle speed

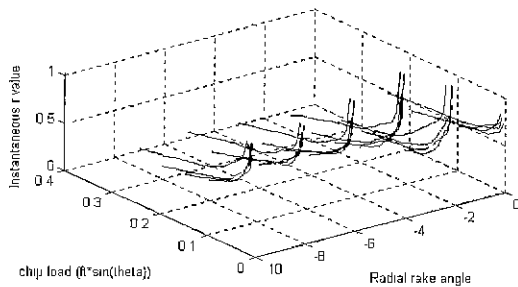


Fig. 6 Instantaneous r value with various radial rake angle

을 하였다.

Fig. 6, 7에서 볼 수 있듯이 같은 절삭조건에서의 r 값은 반경방향 경사각이 변화하면 바뀌지만 축방향 경사각이 변화할 때는 달라지지 않는다. 따라서 반경방향 경사각은 접선방향의 절삭력과 반경방향 절삭력의 비에 영향을 주어서 순간 r 값을 변화시킬 수 있다.

결론적으로 순간 r 값은 이송속도, 축방향 절삭깊이, 주축의 회전속도, 축방향 경사각에 무관하다.

그러므로 순간 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비를 식 (10)처럼 가정한 것은 타당하다.

3.3 절입각과 절삭력비 r 의 수렴여부

반경방향 절입비를 구하는 알고리즘에서 식(9)에 의해 계산된 절입각을 식 (10)에 대입하여 얻은 r 값은 그 전에 식 (9)에 주어진 r 값 사이의 값을 갖는다고 가정하여 외날절삭 실험에서 절입각을 추정하였다. 이 가정이 성립하지 않는다면 반복된 계산에 의해 구해지는 절입각과 r 값은 실제의 절입각과 r 값에 수렴하지 않는다. 이 가정의 타당성을 살펴보기 위해 먼저 식 (9)와 식 (10)에서 절삭력비 r 값에 대한 절입각 ϕ_s 의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{d\phi_s}{dr} = \frac{1 + 2A \tan(\phi_s) - \tan^2(\phi_s)}{2A \tan(\phi_s) \sec^2(\phi_s)} + \frac{1 + 2A \tan(\phi_s) - \tan^2(\phi_s)}{B \cos(\phi_s) (1 + \tan^2(\phi_s))} + \frac{(1 + 2A \tan(\phi_s) - \tan^2(\phi_s))^2}{2A(A \sec^2(\phi_s) + B \sin(\phi_s) - \tan(\phi_s) \sec^2(\phi_s))(1 + \tan^2(\phi_s))} \quad (11)$$

$$\frac{d\phi_c}{dr} = \frac{1}{b_1 b_2 S_t e^{b_2 S_t \sin(\phi_s)} \cos(\phi_s)} \quad (12)$$

$$\text{여기서 } A = b_3 + b_1 e^{b_2 S_t \sin(\phi_s)}$$

$$B = b_1 b_2 S_t e^{b_2 S_t \sin(\phi_s)}$$

Fig. 8은 식 (12)에서 (11)을 뺀 값을 ϕ_s 와 r 값의 함수로 그린 것이다. 그 값은 항상 양이다. 이는 식 (10)에서의 r 값의 변화에 따른 절입각의 변화가 식 (9)에서의 r 값의 변화에 따른 절입각의 변화보다 크다는 것을 의미하므

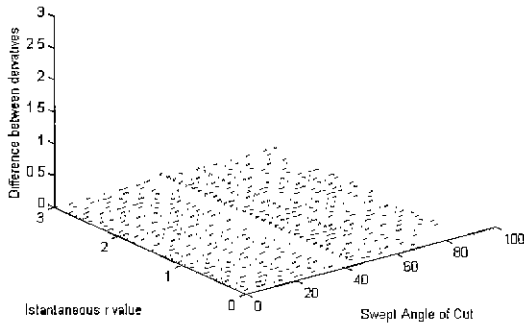


Fig. 8 Difference between derivatives of immersion angle calculated from instantaneous cutting forces and instantaneous cutting force ratio

로 반복된 계산에 의해 구해지는 절입각과 r 값은 실제의 절입각과 r 값에 수렴한다.

3.4 외날 절삭에서의 접선방향에 대한 반경 방향 절입비와 절삭력 비 추정 결과

Fig. 9는 절입각 추정 알고리즘을 이용하여 날당이송, 축방향 절삭깊이, 주축의 회전속도 등 절삭조건이 변화할

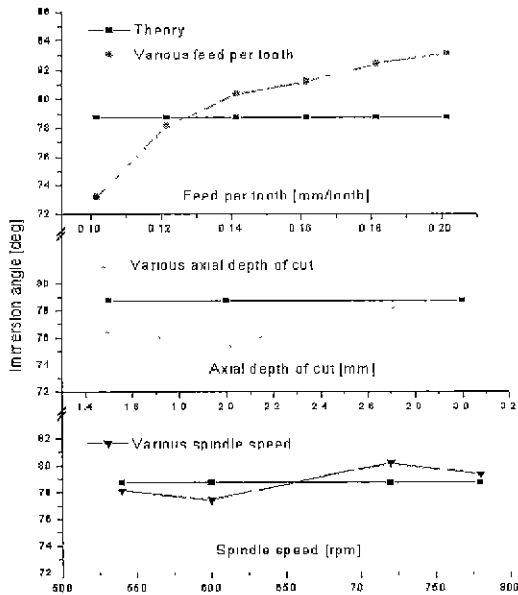


Fig. 9 Estimation of immersion angle with various cutting conditions during 1 tooth cutting

때 절입각을 추정한 결과이다.

이때 주어진 절입각은 78° 이다. 날당 이송이 0.1mm/tooth 일 때 ploughing force에 의해 추정 값이 실제 값이 차이나는 것을 제외하고는 예러가 5%내이다. 이 절입각 추정 알고리즘은 날당이송, 축방향 절삭깊이, 주축의 회전속도 등 절삭조건이 변화하는 외날 절삭 실험에서 효과적임을 알 수 있다.

3.5 다날 절삭에서의 접선방향에 대한 반경 방향 절입비와 절삭력 비 추정 결과

Fig. 10과 Fig. 11은 절입비가 순차적으로 5에서 75 까지 변하고 있을 때 Table 2에 나와 있는 것처럼 축방향 절삭깊이와 주축의 회전속도 등 절삭 조건을 변화시키면서 절입각을 추정한 결과이다.

외날 절삭 실험에서 절입각 추정과 같이 날당이송이 작

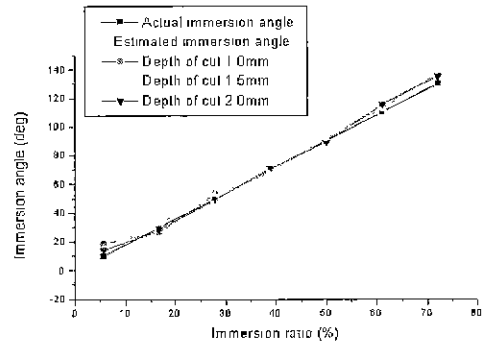


Fig. 10 Estimation of immersion angle with various immersion ratio (various axial depth of cut)

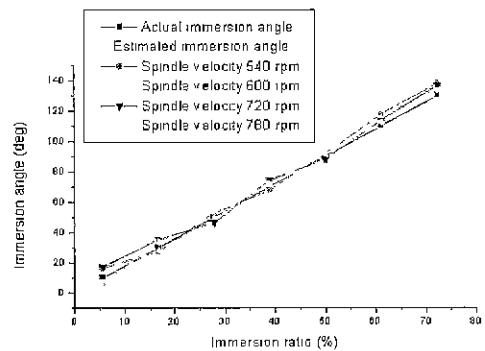


Fig. 11 Estimation of immersion angle with various immersion ratio (various spindle speed)

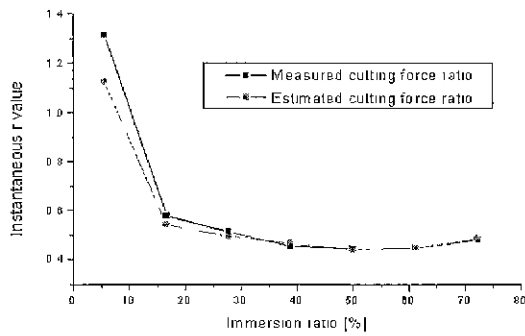


Fig. 12 Instantaneous r value (5 teeth, feed per tooth 0.2mm/tooth, axial depth of cut 1.0mm, spindle speed 600rpm)

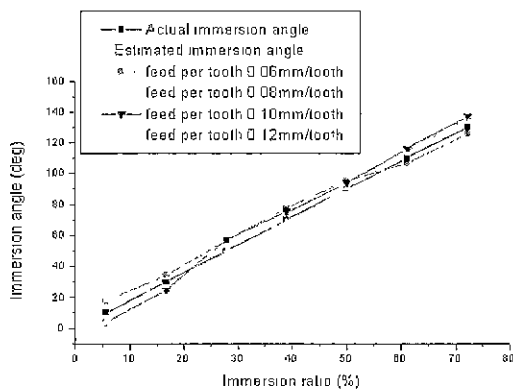


Fig. 13 Estimation of immersion angle with various immersion ratio (various feed per tooth)

은 부분을 제외하고는 절입각 추정결과의 에러가 5%내로 절입각 추정 알고리즘은 다날 절삭(날 수 5개)에서도 효과적임을 알 수 있다. Fig. 12는 다날 절삭에서 날당이송이 0.2 mm/ tooth, 축방향 절삭깊이가 1.0mm, 주축의 회전속도가 600rpm 등의 절삭조건에서 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비를 추정한 결과이다. 절입비가 작을 때 ploughing force에 의해 추정 값이 실험에 의해 측정되어진 값이 차이나는 것을 제외하고는 추정 값과 실험에 의해 측정되어진 값이 잘 맞는다.

Fig. 13은 절입비가 5에서 75까지 순차적으로 변해갈 때 날당이송을 변화시키면서 절입각 추정결과이다. 앞의 실험 결과와는 달리 절입각 추정치가 약간의 오차를 보이고 있는 것은 공구의 edge radius가 78 μ m이고 날당이송이

이와 유사한 60~120 μ m이기 때문에 실제 가공할 때 공구 경사각이 공구가 가지고 있는 경사가 아니라 음의 경사각을 갖는 형태를 취하고, 또한 외날 절삭 실험에서 날당이송에 따른 순간 절삭력비를 원으로 가정하여 순간 칩모드를 구하였지만 실제로는 사이크로이드이므로 순간 절삭력비가 일정한 밴드를 형성하는 것 때문에 비선형적인 결과를 얻게 되었다. 그러나 절입각 추정결과가 실제 절입각과 큰 오차를 보이고 있지는 않다.

4. 결론

정면밀링에서 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력비를 미리 예측하여 반경방향 절입비의 추정에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 불연속적인 절삭력 신호로부터 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 절리는 순간 절삭력을 접선방향과 반경방향 절삭력으로 분리하여 두 절삭력의 성분의 비가 절입각과 순간 r 값의 함수로 나타내었다.
- (2) 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력의 비는 날당 이송, 절삭속도, 축방향 절삭 깊이 등의 절삭조건과는 무관하며 순간 칩두께만의 함수임을 보였다.
- (3) 절입각에서의 절삭 성분의 비와 순간 r 값을 이용한 반복 계산에 의해 절입각과 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력의 비를 효과적으로 구하였다.
- (4) 제시된 알고리즘은 외날 절삭에서 뿐만 아니라 다날 절삭에서도 절입각을 잘 추정하였다.

후 기

본 논문은 1999년도 서울시립대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. Altintas, I. Yellowley, "The identification of radial width and axial depth of cut in peripheral milling", Int. J. Mach. Tools manufact., Vol. 27, No. 3, pp. 367~381, 1987.
- (2) Y. Altintas, I. Yellowley, "In-process detection of tool failure in milling using cutting force models", ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 111, pp. 149~157,

- 1889.
- (3) J. H. Tam, M. Tomizuka, "On-line monitoring of tool and cutting conditions in milling", ASME, J. Eng. for Ind. Vol. 111, pp. 206~212, 1989.
 - (4) 최종근, 양민양, "절삭력을 이용한 엔드밀링 절입깊이 추정", 한국정밀공학회 97년도 춘계학술대회논문집, pp. 1033~1037, 1997.
 - (5) 이성일, "정면밀링에서의 반경방향 절입비 추정", 서울대학교 공학석사 학위논문, 1998.
 - (6) 황지홍, 오영탁, 권원태, 주종남, "정면 밀링에서 절삭력을 이용한 반경방향 정입비의 실시간 추정", 한국정밀공학회지 제16권 제8호, pp. 178~185, 1999.
 - (7) 김명곤, 권원태, "정면밀링에서 절삭력을 이용한 반경방향 절입비와 순간 절삭력 성분 사이의 비 추정", 공작기계학회 '99년도 추계학술대회 논문집 pp. 239~244, 1999.