

## 2 날 엔드밀 슬롯 가공시 칩두께 모델의 개선

이동규<sup>#</sup>, 이기용<sup>\*</sup>, 이근우<sup>\*\*</sup>, 오원진<sup>\*\*</sup>, 김정석<sup>\*\*\*</sup>

### Improvement of Chip Thickness Model in 2-flutes Slot End Milling

Dong-Kyu Lee<sup>#</sup>, Ki-Yong Lee<sup>\*</sup>, Kune-Woo Lee<sup>\*\*</sup>, Won-Zin Oh<sup>\*\*</sup>, Jeong-Suk Kim<sup>\*\*\*</sup>

#### ABSTRACT

Generally, cutting force models use a sin function method to calculate chip thickness. In slot end milling, the error from a sin function method is much bigger than other machining because a tool rotation angle in cutting is much larger. Thus in this paper, a new method to calculate chip thickness was suggested and evaluated. In a new method, tool position data according to tool rotation are checked and stored so that it is possible correct chip thickness is calculated. Cutting force waveforms simulated from a sin function method and a new method and measured waveforms from experiments were compared and error percentages were obtained. Finally, a new method had good results for simulating cutting force in slot end milling.

**Key Words** : Cutting force model (절삭력 모델), Chip thickness (칩두께), Slot end milling (슬롯 엔드밀 가공), Simulation (시뮬레이션), Cutting force waveform (절삭력 파형), Error percentage (오차율)

#### 기호설명

$R$  : tool radius  
 $t_c$  : chip thickness  
 $f_i$  : feed per tooth  
 $\theta$  : tool rotation angle

#### 1. 서론

절삭을 통한 최적의 표면을 얻기 위해서는 절삭 과정 중의 진동이나 공구의 휘어짐 등을 예측하고 이를 고려한 공구 경로를 생성할 필요성이

있다. 진동이나 공구의 휘어짐 등은 그 원인이 절삭 과정에서 발생하는 절삭력에 의한 것이므로 절삭력 모델링이 선행되어야 하며 이에 따라 다양한 절삭 상태에 따른 절삭 모델이 제시되고 있다.<sup>1,2</sup>

엔드밀링의 절삭 모델은 주로 측면 절삭 모델이 연구되고 있는데 이는 엔드밀이 주로 부품의 측면 가공에 사용되기 때문이다. 그러나 공구개발기술의 발달과 더불어 공구의 강성 및 내마멸성이 향상됨에 따라 과도한 절삭깊이가 주어지는 슬롯 가공에도 엔드밀을 사용하는 경우가 많아지고 있다.<sup>3,4</sup>

대부분의 측면가공에서는 반경방향 절삭깊이

접수일 : 2004 년 5 월 12 일; 게재승인일: 2004 년 10 월 7 일  
<sup>#</sup> 한국원자력연구소  
 Email : dglee@kaeri.re.kr Tel. (042) 868-2049  
<sup>\*</sup> 한국생산기술연구원  
<sup>\*\*</sup> 한국원자력연구소  
<sup>\*\*\*</sup> 부산대학교 기계공학부

가 공구의 반경에 비해 훨씬 작은 값이 주어지므로 측면 절삭 모델에서는 칩두께가 작은 경우만을 고려하는 경우가 많다. 이러한 경우 일반적으로 비절삭저항은 상수로 가정하고 칩두께를 계산하기 위한 모델식은  $\sin$  함수로 가정하게 된다.<sup>5,6</sup> 측면 절삭과 같이 반경방향 절삭깊이가 미소한 경우 위와 같은 모델은 잘 적용될 수도 있으나 슬롯 가공과 같이 반경방향 절삭깊이가 공구의 직경과 같은 경우 칩두께의 변화가 크고, 증가했다가 감소하는 특징을 가지고 있으므로 측면 절삭 모델을 적용하기는 어려울 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 기존의  $\sin$  함수식과는 다른 칩두께 계산 모델을 제시하고 이를 바탕으로 슬롯 가공에 대한 엔드밀 절삭력을 시뮬레이션하였다. 제시된 칩두께 모델을 사용하여 엔드밀 슬롯가공시 변화가 큰 칩두께에 대해 기존의 칩두께 모델이 보이는 오차를 줄이고 절삭이 시작되는 지점과 끝나는 지점의 오차를 제거하였다. 제시된 칩두께 모델의 효용성을 검증하기 위해 기존의 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력과 개선된 칩두께 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력을 실험결과와 비교·평가 하였다.

## 2. 개선된 칩두께 모델

일반적으로 절삭력을 시뮬레이션하는 방법은 칩두께를 계산하여 비절삭저항을 곱하는 방법이다. 여기서 비절삭저항은 공구와 가공대상의 재질, 절삭속도, 이송속도 등 가공조건의 함수로서 많은 실험에 의해 데이터가 확보되어 있는 실정이다. 반면 칩두께를 계산하는 방법은 식(1)과 같이  $\sin$  함수로 간단히 계산하는 방법을 주로 사용하고 있다. 이 방법은 반경방향 절삭깊이가 작아 공구회전각이 작을 경우 큰 문제가 없지만, 슬롯가공과 같이 절삭되는 부분에서 공구회전각이  $180^\circ$  이상 변화하는 가공에서는 Fig. 1 과 같은 문제점이 나타난다.

$$t_c = f_i \sin \theta \quad (1)$$

여기서,  $t_c$ : 칩두께(mm)

$f_i$ : 날당 이송량(mm/tooth)

$\theta$ : 공구회전각(radian)

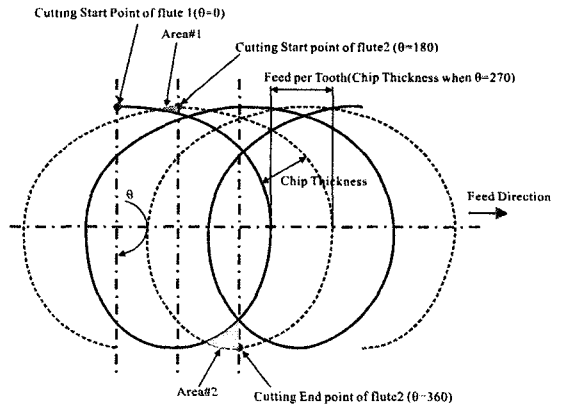


Fig. 1 Tooth path of 2-flute end mill

Fig. 1 에서 실선을 1 번날의 위치, 점선을 2 번 날의 위치라고 하면, 칩두께는 실선과 점선 사이의 차가 된다. 식(1)에 의하면  $\theta = 180^\circ$ 에서 칩두께는 0 이 되지만 실제로는 Fig. 1 과 같이 0 이 아니며 Area#1 에 의한 부분이 오차로 발생한다. 또한  $\theta = 360^\circ$ 에서 식(1)은 칩두께를 0 으로 계산하지만 실제로는 0 이 아니며 Area#2 와 같은 오차가 발생하게 된다. Fig. 1 의 경우는 날당 이송량이 매우 크다고 가정하였을 경우이며 실제 절삭시 날당 이송량이 작을 경우는 Area#1 영역은 거의 무시할 정도로 작을 것이므로 반경방향 절삭깊이가 작을 경우에는 식(1)을 적용해도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 Fig. 1 에서 확인할 수 있듯이 Area#2 부분의 오차는 Area#1 부분에 의한 오차보다 매우 크므로 슬롯 가공에  $\sin$  함수에 의한 칩두께 계산식을 적용하는 것은 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있다. 이러한 오차를 제거하기 위해서 Fig. 2 와 같이 칩두께 모델을 개선하였다.

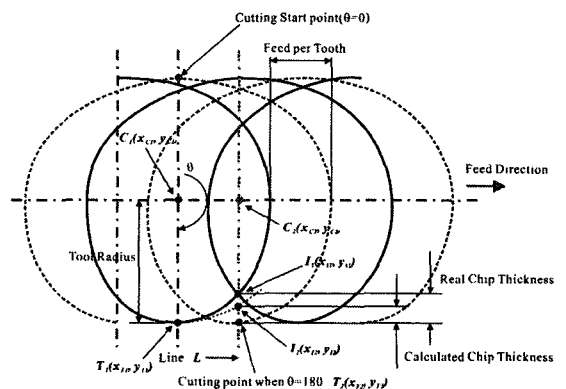


Fig. 2 Chip thickness calculation

개선된 칩두께 모델은 sin 함수 계산식을 전혀 사용하지 않으며 이산화 모델에서 실제 생성되는 칩두께를 가장 근사하게 계산해 낼 수 있는 방법을 사용하였다. Fig. 2 는 sin 함수 계산식을 사용할 경우 오차 발생 부분이 가장 큰 부분에 대해 개선된 칩두께 모델을 적용한 경우이다. 실제  $\theta = 180^\circ$  에서 발생하는 칩두께는 식(2)와 같다.

$$t_c = |T_2(x_{T2}, y_{T2}) - I_1(x_{I1}, y_{I1})|$$

$$= \sqrt{(x_{T2} - x_{I1})^2 + (y_{T2} - y_{I1})^2} \quad (2)$$

그러나 절삭력 모델에서 이산화된 공구 날끝 위치로부터  $I_1$  을 정확히 계산하기는 어렵다. 따라서 본 모델에서는 현재 공구 날끝의 위치인  $T_2$  와 날당 위상차인  $180^\circ$ 만큼 앞선 공구 날끝 위치인  $T_1$  을 구한 후 이 때의 공구 중심인  $C_1$  을 중심으로  $T_1$  이 반경이 되는 원의 식을 식(3)과 같이 계산한다.

$$(x - x_{C1}) + (y - y_{C1}) = R^2 \quad (3)$$

여기서,  $R$ : 공구반경

또한, 현재 날끝 위치인  $T_2$  에 해당하는 공구 중심  $C_2$  를 구한 후  $C_2$  와  $T_2$  가 이루는 직선 식을 식(4)와 같이 계산한다.

$$y - y_{C2} = \frac{y_{T2} - y_{C2}}{x_{T2} - x_{C2}}(x - x_{C2}) \quad (4)$$

식(3)과 (4)로부터 교점을 구하면 Fig. 2 의  $I_2(x_{I2}, y_{I2})$ 와 같다. 본 모델에서 계산된 칩두께는 식(5)와 같이  $I_2$  와  $T_2$  의 차이이다.

$$t_c = |T_2(x_{T2}, y_{T2}) - I_2(x_{I2}, y_{I2})|$$

$$= \sqrt{(x_{T2} - x_{I2})^2 + (y_{T2} - y_{I2})^2} \quad (5)$$

식(5)에서 계산된 칩두께는 Fig. 2 에서 확인할 수 있듯이 오차가 존재한다. 그러나 Fig. 2 는 모델 설명을 위해 가공이 이루어 질 수 없는 큰 이송량을 가지는 경우이고 실제 가공시에 적용되는 이송

량에 대해서는 오차 부분이 무시할만한 수준이 될 것이다. 즉, 이송량이 작아질수록 오차는 0 에 가깝게 된다. 개선된 칩두께 모델의 특징은 미소 시점에서의 공구 날끝 경로가 원이라고 가정하였으므로 이송량이 작아질수록 가정은 더 잘 성립 된다.

슬롯 가공시 식(3)과 (4)의 교점  $I_2(x_{I2}, y_{I2})$ 는  $x_{T2} \neq x_{C2}$  인 경우 식(6)~(8)과 같이 계산된다.

$x_{T2} > x_{C2}$  인 경우,

$$x_{I2} = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{-2a_1} \quad (6)$$

$x_{T2} < x_{C2}$  인 경우,

$$x_{I2} = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{-2a_1} \quad (7)$$

$y_{I2}$ 는 공통적으로,

$$y_{I2} = ax_{I2} + b \quad (8)$$

여기서,

$$a_1 = 1 + a^2$$

$$b_1 = 2ac - 2x_{C1}$$

$$c_1 = x_{C1}^2 - c^2 - R^2$$

$$a = \frac{y_{T2} - y_{C2}}{x_{T2} - x_{C2}}$$

$$b = -ax_{T2} + y_{T2}$$

$$c = b - y_{C1}$$

$x_{T2} = x_{C2}$  인 경우 교점  $I_2(x_{I2}, y_{I2})$ 는 식(9)~(11)과 같이 계산된다.

$\theta \leq 90^\circ$  인 경우,

$$y_{I2} = \sqrt{R^2 - (x_{C2} - x_{C1})^2} + y_{C1} \quad (9)$$

$\theta > 90^\circ$  인 경우,

$$y_{I2} = -\sqrt{R^2 - (x_{C2} - x_{C1})^2} + y_{C1} \quad (10)$$

$x_{12}$ 는 공통적으로,

$$x_{12} = x_{C2} \quad (11)$$

위와 같이 계산된  $I_2(x_{12}, y_{12})$ 는 식(5)에 대입되어 최종적으로 칩두께를 계산하게 된다.

### 3. 칩두께 모델의 검증

제시된 칩두께 모델의 효용성을 검증하기 위해 실험을 통해 측정된 절삭력과 sin 함수에 의한 칩두께 모델 및 개선된 칩두께 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력을 비교하였다. 여기서 절삭력 모델은 Tlusty<sup>7,8</sup> 등이 제시한 비교적 일반적인 절삭력 모델을 사용하였다.

#### 3.1 실험장치 및 구성

절삭력 측정을 위한 실험장치는 Fig. 3 과 같이 구성하였다. 3 축 머시닝센터에 알루미늄 전용공구 2 날 HSS 엔드밀(한국야금,  $\phi 8\text{mm}$ , 헬릭스각  $30^\circ$ )을 사용하여 슬롯가공을 수행하였고 절삭력은 동력계(Kistler, 9265B)로 측정하였다. 공작물은 알루미늄(6061T6)을 사용하였고 슬롯가공에 용이하도록 Fig. 3 과 같이 제작하였다. 절삭조건은 Table 1 과 같다. 알루미늄 엔드밀 절삭시 일반적인 주축회전수는 3000rpm 정도이나 본 가공에서는 건식절삭이므로 그 이하의 주축회전수에서 실험을 수행하였다.<sup>9</sup>

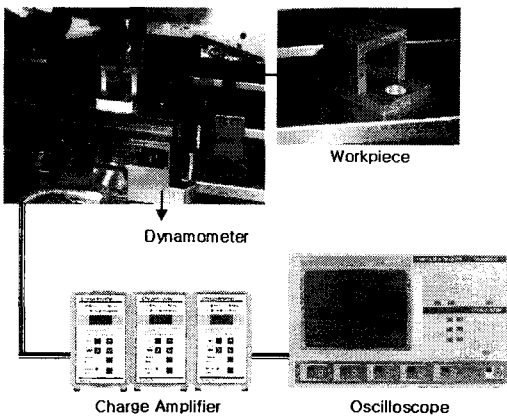


Fig. 3 Experimental set-up

Table 1 Cutting conditions for experiments

Experiment Num.	Spindle Rotation Speed (rpm)	Feed Speed (mm/min)
1	2000	100
2	2000	125
3	2000	150
4	2500	100
5	2500	125
6	2500	150
7	3000	100
8	3000	125
9	3000	150

#### 3.2 실험 및 시뮬레이션 결과

총 9 회의 실험을 수행하였으며 기존의 sin 함수에 의한 칩두께 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력과 개선된 칩두께 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력을 비교하였다.

Fig. 4 의 경우 2000rpm, 100mm/min 의 절삭조건으로 실험한 결과 및 시뮬레이션 결과이다.

일견하기에 sin 함수 칩두께 계산식을 사용한 경우 시뮬레이션 결과와 실험 결과에 많은 차이가 있으며 새로운 방식을 적용한 경우 거의 유사한 절삭력 파형을 보임을 알 수 있다. 보다 정확한 오차율을 검토하기 위해 절삭력 파형의 각 피크별 오차율을 측정해 보았다. Fig. 4 에서 보이는 바와 같이 파형의 오차율을 4 개로 나타내어 각각 Error#1 ~ 4 까지의 수치로 나타내었다. 오차율을 계산하는 식은 식(12)와 같다.

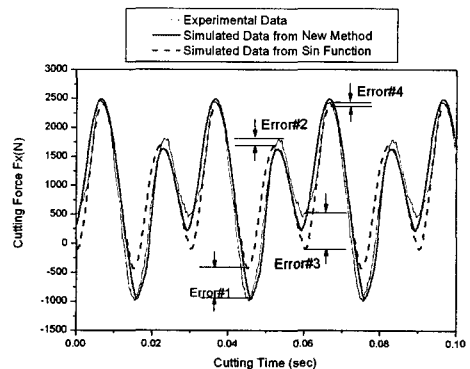


Fig. 4 Cutting force comparison at Exp. 1.

$$\text{오차율} = \frac{\text{Error \#1} \sim 4}{\text{총절삭력}} \times 100 \quad (12)$$

여기서, 총절삭력 : 실험으로부터 측정된 절삭력 파형의 최저점과 최고점 사이의 간격

Fig. 4 의 경우 총절삭력은 3430N 이며 sin 함수 계산식에 의한 오차율은 Error#1 ~ 4 에 해당하는 수치가 각각 16%, -3.5%, -16.6%, -1.5%이며, 새로운 방식에 의한 오차율은 0.9%, -5.5%, -7.6%, 1%로 나타났다. 측정된 절삭력 보다 큰 경우 +오차율, 작은 경우 -오차율로 표시하였다. 실제 공구에 작용하는 최대 절삭력은 총절삭력이며 이는 Error#1 과 Error#4 의 오차율이 작을수록 정확하다고 할 수 있다. sin 함수식에 의한 시뮬레이션의 경우 Error#1 의 오차율이 상당히 크므로 공구에 작용하는 절삭력 예측에는 부적절하다고 사료된다. 이에 반해 새로운 방식에 의한 오차율은 비교적 양호한 편이며 Error#3 의 경우 가장 큰 오차율을 보이는데 이는 새로운 방식의 계산 과정에서 미소 시점에서 공구 날끝 경로가 원이라고 가정한 데에 기인한 것으로 사료된다. 각 절삭조건에 대해 측정된 오차율은 Table 2 와 같다. 여기서 Error#5 는 Error#1+Error#4 로써 총절삭력에 대한 오차율로 정의하였다.

Table 2 를 살펴보면, sin 함수 계산식에 의한 오차율은 전반적으로 Error#1 에 의한 오차율이 가장 크며 이에 의해 총절삭력에 대한 오차율 Error#5 도 커지게 된다. Error#1 의 경우 공구회전각으로 살펴보면 180° 근처이며 앞서 슬롯 가공시 sin 함수 계산식에 의한 오차가 가장 심할 것으로 예상되는 부위에서 역시 가장 큰 오차율을 보였다. Error#3 에서도 sin 함수 계산식에 의한 오차율이 비교적 크게 나타났으며 이 때 해당되는 공구회전각은 0°이다. Error#2 와 Error#4 에서는 새로운 방식에 의한 오차율이 sin 함수 계산식에 의한 오차율보다 약간 작음을 알 수 있으며 공구회전각 0°, 180°이외의 부분에서는 거의 유사한 시뮬레이션 결과를 보인다고 할 수 있다.

반면 새로운 방식에 의한 절삭력 시뮬레이션 결과는 Error#1 및 Error#4 에 대해 매우 양호한 오차율을 보이며 따라서 총절삭력에 대한 오차율도

매우 양호하게 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 공구회전각 180° 근처에서 sin 함수 계산식에 의해 우려되던 오차를 새로운 방식의 칩두께 계산법이 효과적으로 적용되었음을 확인 할 수 있다. 공구회전각이 0° 근처인 Error#3 에서는 새로운 방식의 계산법도 sin 함수 계산식에 비교하면 양호하나 전체적으로 큰 오차율을 보이는데 이는 칩두께 계산 법에 의한 오차라기보다는 180° 근처에 비해 0° 근처에서 칩두께가 매우 미소하게 되므로 치수효과에 의해 비절삭저항이 급격하게 증가됨으로써 이를 반영하지 못한 절삭력 모델에 의한 오차로 사료된다.

Table 2 Error percentage obtained from a sin function method and a new method (unit : %)

Exp. Num.	Sin Function Method				
	Error#1	Error#2	Error#3	Error#4	Error#5
1	16.0	-3.5	-16.6	-1.5	14.5
2	15.8	5.0	-12.0	-2.0	13.8
3	13.0	7.6	-8.7	-2.0	11.0
4	16.6	-8.8	-16.6	-2.6	14.0
5	15.8	-1.8	-13.6	-3.1	12.7
6	17.4	-4.3	-9.2	-1.7	15.7
7	17.1	-14.7	-14.6	-3.3	13.8
8	14.1	-9.0	-17.0	-2.4	11.8
9	16.7	2.1	-8.4	-3.7	13.0

Exp. Num.	New Method				
	Error#1	Error#2	Error#3	Error#4	Error#5
1	0.9	-5.5	-7.6	1.0	1.9
2	1.6	3.1	-1.9	0.1	1.7
3	0.2	5.9	1.6	-0.1	0.1
4	-0.3	-10.8	-9.8	0.1	-0.2
5	0.4	-3.7	-4.7	-0.7	-0.3
6	3.4	-6.2	0.6	0.5	3.9
7	-0.7	-16.7	-10.3	-0.3	-1.0
8	-3.1	-11.1	-9.5	0.4	-2.7
9	1.6	0.1	0.4	-1.2	0.4

Fig. 5 에 총절삭력에 대한 오차율이 가장 큰 실험조건 6, 즉 2500rpm, 150mm/min 의 절삭조건으로 실험한 결과 및 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Fig. 5는 새로운 방식에 의한 총절삭력의 오차가 가장 큰 경우임에도 측정된 절삭력 파형과 시뮬레이션된 절삭력 파형이 잘 일치함을 볼 수 있다. 그 외 총절삭력의 오차율이 더 작은 경우에는 Fig. 5의 경우보다 더 정확하게 절삭력 파형을 예측함을 파악하였다. 따라서 새로운 방식의 칩두께 계산법은 sin 함수 계산법에 비해 절삭력 파형의 예측에 더욱 효과적임을 알 수 있다.

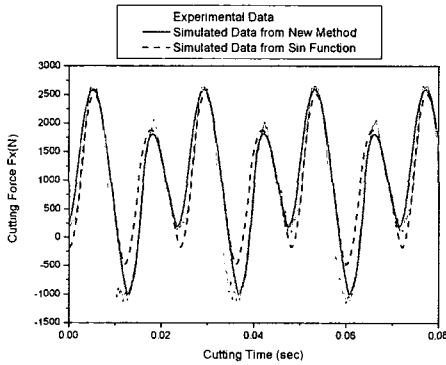


Fig. 5 Cutting force comparison at Exp. 6.

Fig. 6은 실험조건 9(3000rpm, 150mm/min)에 대한 실험 결과 및 시뮬레이션 결과이다. 역시 새로운 방식의 칩두께 계산법에 의한 절삭력 시뮬레이션 결과가 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 4~6의 절삭력 비교결과에서 공구의 각 절삭날에 발생하는 절삭력의 최고값이 다르게 예측되고 있는 이유는 초기 공구 셋팅시 필연적으로 발생하는 설치오차, 즉 런아웃에 의한 것으로 본 연구에서는 런아웃을 고려한 절삭력 모델을 통해 실제 절삭력과 유사한 절삭력을 예측하였다.<sup>10</sup>

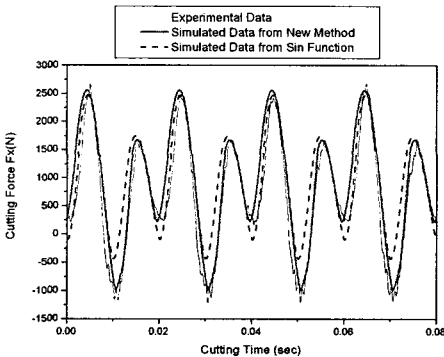


Fig. 6 Cutting force comparison at Exp. 9.

이상과 같은 실험을 통해 엔드밀 슬롯 가공시 새로운 방식의 칩두께 계산법이 sin 함수를 통한 칩두께 계산법에 비해 훨씬 효과적으로 절삭력 파형을 예측함을 증명하였다. 이론적 전개 과정에서 예상한 바와 같이 sin 함수에 의한 칩두께 계산법은 Error#1(180°부근)과 Error#3(0°부근)에서 가장 큰 오차를 보이며 특히 Error#1에서의 큰 오차는 공구에 작용하는 총절삭력의 오차를 크게 함으로써 정확한 절삭력 시뮬레이션에 많은 지장을 주게 된다.

따라서 슬롯 가공의 경우와 같이 절삭 시작위치와 끝위치에서 기하학적 칩두께를 sin 함수 계산식으로 정확하게 예측할 수 없는 경우 본 연구에서 제안한 새로운 방식의 칩두께 계산법을 사용하면 보다 정확한 절삭력 예측이 가능하며 공구에 작용하는 총절삭력의 정확한 예측에도 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

2 날 엔드밀 슬롯 가공시 유용하게 적용되는 개선된 칩두께 모델을 제시하였다. 일반적으로 칩두께 계산에 사용하는 sin 함수 계산법으로 칩두께 계산시 발생하는 오차를 분석하고 이를 보완하기 위해 공구 위치를 이산적으로 추적하여 매 순간 칩두께를 계산해주는 방법을 제시하였다. 칩두께 모델을 검증하기 위해 절삭력 실험을 수행하여 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교, 분석하였다. 절삭력 파형에 대해 5개의 오차율을 정의하고 이를 통해 절삭력 파형 오차를 분석한 결과 개선된 칩두께 계산법이 sin 함수 계산법에 비해 보다 정확하게 절삭력을 예측하였으며 특히 sin 함수 계산법을 사용시 큰 오차가 우려되는 공구회전각 0°와 180°에서 비교적 정확한 예측 결과를 보였다. 따라서 슬롯가공의 경우 본 연구에서 제시한 칩두께 계산법을 사용하여 절삭력을 보다 정확하게 예측할수 있음을 입증하였다. 본 논문에서 제시한 개선 칩두께 모델은 비록 기존의 sin 함수 계산법에 비해 더 정확한 절삭력 계산이 가능하지만, 이를 위해서는 보다 난해한 시뮬레이션 프로그래밍 기법이 요구되며 특히 정확한 절입각(entry angle)과 절탈각(exit angle)을 계산하는 것이 어려우므로 공구회전각을 매개변수로 하여 프로그래밍시 상당한 애로사항이 있다. 차후 이와 같

은 프로그래밍 기법에 대한 연구를 수행하여 본 모델을 개선한다면 보다 효과적인 모델이 될 것으로 사료된다.

and Measurement Method in 4-flutes End Milling," *Journal of the KSPE*, Vol. 21, No. 3, pp. 22-29, 2004.

## 후 기

이 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Fuh, Kuang-Hug, "A Predicted Milling Force Model for High-speed End Milling Operation," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 37, pp. 969-979, 1997.
2. Bayoumi, A. E., "An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 324-330, 1994.
3. Lee, Sang-Kyu, Ko, Sung-Lim, "Analysis of the Precision Machining in End Milling Operation by Simulating Surface Generation," *Journal of the KSPE*, Vol. 16, No. 4, pp. 229-236, 1999.
4. Lee, Ki-Yong, Kim, Jeong-Suk, "The Prediction of Cutting Force and Surface Topography by Dynamic Force Model in End Milling," *Journal of the KSPE*, Vol. 14, No. 4, pp. 38-45, 1997.
5. Zhang, Lei, Zheng, Li, "Prediction of Cutting Forces in Milling of Circular Corner Profiles," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 225-235, 2004.
6. Gradisek, Janez, Kalveram, Martin, "Mechanistic Identification of Specific Force Coefficients for a general End Mill," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 401-414, 2004.
7. Thusty, J., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 21-25, 1975.
8. Thusty, J., "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169-175, 1991.
9. Satou, Kiyohito, "切削加工 技術 テータ集," *New Technology Development Center*, 1983.
10. Lee, Ki-Yong, Kim, Jeong-Suk, "Runout Modeling