

◆ 특집 ◆ 공작기계의 소비 에너지 저감기술

## 공작기계의 절삭공정 소비 에너지 예측기술

### Prediction of Machine Tool's Energy Consumption during the Cutting Process

이찬홍<sup>1,✉</sup>, 황주호<sup>1</sup>, 허세곤<sup>1</sup>  
Chan-Hong Lee<sup>1,✉</sup>, JooHo Hwang<sup>1</sup>, and Segon Heo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Department of Ultra Precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery and Materials)  
✉ Corresponding author: chlee@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7120

Manuscript received: 2015.3.10. / Revised: 2015.3.19. / Accepted: 2015.3.19.

*In this paper, a simulation based estimation method of energy consumption of the spindle and feed drives for the NC machine tool during the cutting process is proposed. To predict energy consumption of the feed drive system, position, velocity, acceleration and jerk of the table are analyzed based on NC data and then the power and energy are calculated considering friction force and mass of the stages. Energy consumption of the spindle is estimated based on models from acceleration motion of rotating parts, friction torque and power loss of motors. Moreover, simulation models of cutting power and energy for the material removal along the NC tool paths are proposed.*

KEYWORDS: Energy consumption of machine tools (공작기계의 에너지 소비량), Energy consumption of spindle (주축 에너지 소비량), Cutting energy (절삭 에너지)

#### 1. 서론

세계 시장에서의 치열한 경쟁은 기업이 장비의 생산성을 극대화시키는데 집중하게 하였다. 그러나 21세기 산업사회는 기업의 이익 창출 외에 점차 공적인 이익 생성에도 관심을 갖게 되었고, 더 나아가 현재와 미래를 아우르는 기업의 지속적 성장을 추구하고 있다. 대표적인 사회 이슈로 에너지 사용 효율성과 절약이라는 테마가 광범위한 사회 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. 공작기계는 에너지 생성의 마지막 단계인 전기 에너지를 많이 사용하는 장비로 지정될 정도로 적극적 개선

이 요구되는 생산장비이다.

Fig. 1은 에너지 저감의 전략을 보여준다. 공작기계의 적극적 에너지 절감 방법은 공작기계 구조물의 설계적 개선 방법, 주변장치의 에너지 효율 개선 방법, 가공공정의 에너지 효율 개선 방법 등이 있다. 추가적으로 수동적 에너지 절감방법으로는 장비의 사용 후 에너지 재활용과 장비의 에너지 소비량 억제 등이 있다.

공작기계에서의 소비 에너지 저감의 의미는 일차적으로 전기에너지의 절약으로 에너지 비용을 낮추는 것이고, 이차적으로 장비의 과잉 에너지가 변환된 발열로 인한 구조물의 열변위를 최소화하

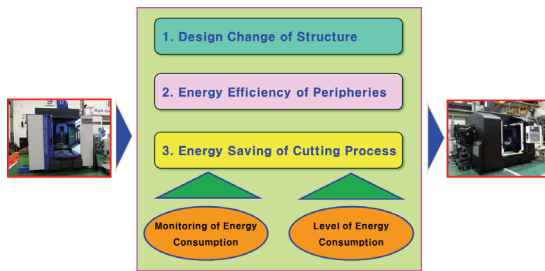


Fig. 1 The strategy of energy saving in the machine tools

는 데 있다. 그래서 공작기계의 소비 에너지 저감 기술은 장비의 관리비용을 낮추는 것은 물론, 가공 정밀도를 향상시키는 신기술로써 비중 있게 다루어지고 있다.

본 논문에서는 공작기계가 가공을 실행하고 있는 동안 장비의 주요 운동 유니트에서 소비하는 에너지와 공구에 의한 재료 제거에 소비되는 에너지의 예측 기법을 서술하였다. 우선 NC 데이터에 정의된 공구궤적에 따른 이송 질량의 운동 가속도에 의해 소비되는 에너지를 계산하는 방법을 설명하고, 다음으로 주축의 운전 중에 필요한 에너지와 베어링 및 회전모터에서 소모되는 에너지 손실을 예측할 수 있는 모델을 구축하였다. 마지막으로 밀링가공 시 가공물 재료의 제거에 따른 절삭 동력 및 절삭에너지 예측 시뮬레이션 모델을 제안하였다.

2. NC 이송에 의한 이송계 소비에너지 예측

Fig. 2와 같은 5축 가공기에서 임의의 공작물을 가공할 때, 각 이송축은 NC 지령에 따라 각각 독립적인 운동을 하게 된다. 이와 같이, 장비에서 가공 중에 소비하는 총 운동에너지는 Fig. 3에 보이는 바와 같이 시간에 대한 동력(power)의 합으로 계산된다. 그림에서 보듯이 공작기계에 유입되는 전기는 전장박스의 주전원 스위치를 켜면서 소형 변압기에서 다양한 삼상 및 단상 전압을 만들면서 전력을 소비하고, CNC 를 켜면서 다섯 개 축의 서보 모터가 이송 테이블의 현 위치를 강제로 고정시키면서 추가적인 전력을 소비한다. 그리고 각 이송축의 가속도와 운동질량의 크기에 따라 소비 전력이 달라진다. 또한, 주축의 회전수와 베어링에서의 마찰 저항으로 인해 소비 전력이 변화한다. 그러나 소비 전력이 매우 큰 냉각기와 유압 공급 장치가 간헐적으로 작동하면 장비의 총 소비 전력

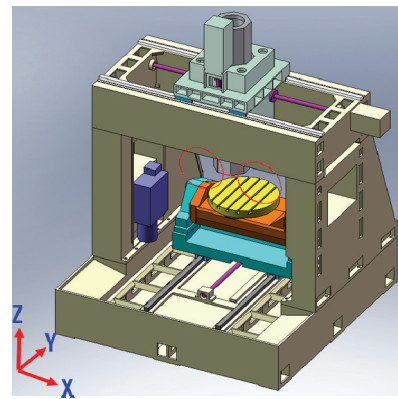


Fig. 2 NC motion of feeding units in 5-axis machine

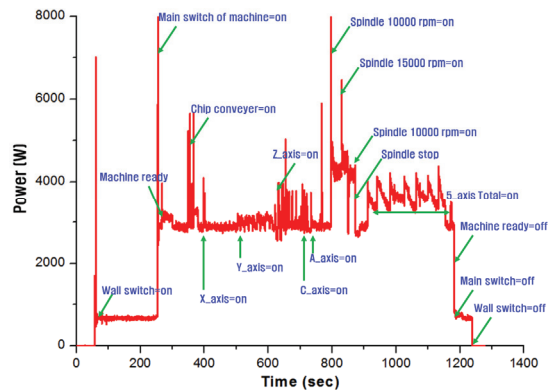


Fig. 3 Energy consumption of 5-axis machine during the feeding motion

으로부터 이송계의 작은 소비 전력의 변화를 구분하기 어렵다. 특히 이송속도가 작은 경우에는 이송계의 운동에 의한 전력 소비 경향을 알 수 없다.

그러므로 이송계의 소비 전력을 예측하기 위해서 NC 데이터로부터 각 축의 순차적 위치와 시간에 대한 위치, 속도, 가속도, 저크(Jerk)를 추출한다.<sup>1,2</sup> 저크가 없는 경우, 아래 식(1)과 같은 간단한 운동방정식을 이용하여 초기 설정한 가속시간  $t_1$  동안 목표속도  $V_s$ 에 도달하기 위한 가속도  $a_s$ 가

$$\begin{aligned}
 V_s &= a_s \cdot t_1 \\
 S_a &= \frac{1}{2} \cdot V_s \cdot t_1 = \frac{1}{2} \cdot a_s \cdot t_1^2 \\
 S_g &= S_a + V_s \cdot t_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

계산되고, 이 때, 도달한 거리는  $S_a$ 가 된다. 또한, 예정된 목표거리  $S_g$ 까지는 목표속도  $V_s$ 로  $t_2$ 의 시

```

X0.Y0.Z0.F2000
X24.5017,,,
X24.7316,Y-.056,,
X25.0017,Y-.4967,,
X25.4346,Y-.8.062,,
X26.6287,Y-15.545,,
X28.5718,Y-22.8694,,
X31.244,Y-29.9603,,
X34.6182,Y-36.7453,,
X38.6598,Y-43.1552,,
X43.3275,Y-49.1246,,
X48.5738,Y-54.5926,,
X54.345,Y-59.5031,,
X60.5824,Y-63.8063,,
X67.2221,Y-67.4582,,
X74.1964,Y-70.4214,,
X81.4341,Y-72.6657,,
    
```

Fig. 4 NC data for machining of the twin circle

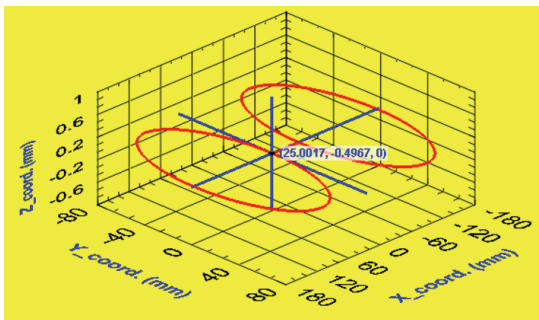


Fig. 5 Tool trajectory for the twin circle

간이 더 소요된다.

위치, 속도, 가속도의 데이터를 이용해서 아래 식(2)와 같이 이송체의 질량과 속도 및 이송거리를 곱하여 소요동력과 일(work)을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Power} &= F \cdot V = m \cdot a \cdot V \\
 \text{Work} &= F \cdot S = m \cdot a \cdot S
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

가상적인 예로 쌍 원 형태의 가공을 위해서 Fig. 4에 나타낸 NC 데이터로 가공하는 것을 가정하였다. Fig. 5는 NC 데이터에 의한 쌍 원 형태의 공구궤적을 보여준다. 이는 X축과 Y축 각각의 직선 이송의 복합으로 만들어지는 간단한 형태이다. 이 때, 이송속도는 첫 원주에서 20 m/min로 하였고, 두 번째 원주에서 80 m/min로 설정하였다. 이 이송속도는 X, Y, Z 축 방향의 속도로 분리되고, 계속해서 위치와 가속도, 저크를 계산한다.

Fig. 6은 X축 방향의 위치, 속도, 가속도, 저크의 계산 결과를 나타낸다. 목표위치까지 도달하는데 소요되는 시간은 약 1.95초이고, 첫 번째 원주에서 X축의 속도는 약 0.3 m/s, 가속도는 약 9 m/s<sup>2</sup>

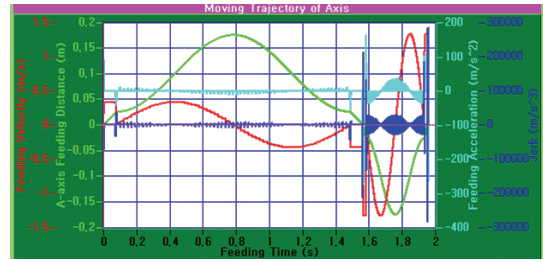


Fig. 6 Distance, velocity, acceleration and jerk of X-axis feeding unit with respect to the time

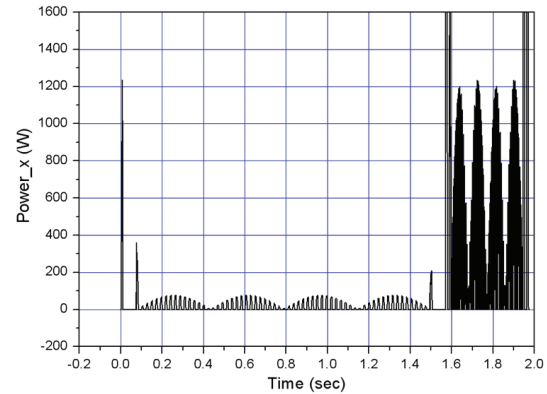


Fig. 7 Power consumption of X-axis feeding unit

까지 도달하였고, 두 번째 원주에서는 가속도가 약 22 m/s<sup>2</sup> 까지 도달하였다. Fig. 7에는 이송체의 질량이 100 kg, LM안내면에서 마찰력이 200 N일 때의 소요동력을 보여주며, 첫 원호 이송 시에는 약 100 W정도까지 상승하고, 두 번째 원호 이송 시에는 약 1,200 W 까지 상승한다. 총 소비 에너지는 가공 소요시간에 대해 이송에 필요한 전력을 적분하여 계산하였으며, 그 값은 약 370 J이다.

### 3. 주축의 소비에너지 예측

공작기계의 운동요소는 2~5 축의 직선 및 회전 운동 테이블과 공구 혹은 공작물을 회전시키는 스피들로 이루어져 있다. 본 연구의 대상인 머시닝 센터 스피들은 고속가공을 위하여 내장형 유도전동기를 구동원으로 하는 고속 스피들을 일반적으로 채용하고 있다. 본 장에서는 유도 전동기를 사용하는 고속 스피들의 소요동력을 예측하고 이를 통하여 에너지를 저감할 수 있는 전략에 대하여 기술하였다.

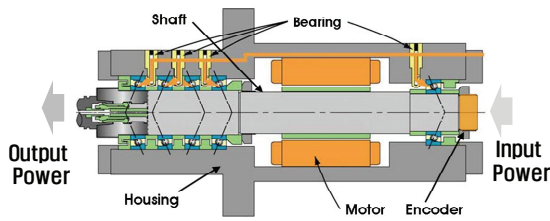


Fig. 8 Schematic diagram for the spindle and power consumption

3.1 주축의 사용동력 예측

Fig. 8은 스피들의 구조를 보여준다. 여기서, 스피들의 소요동력은 스피들의 사용동력과 손실동력으로 나눌 수 있다. 사용동력은 가감속, 정속운전 등 실제 스피들의 움직임에 필요한 동력과 절삭에 필요한 동력으로 나눌 수 있으며, 손실동력은 모터손실과 베어링 등에서의 마찰손실 등으로 나눌 수 있다. 가감속에 필요한 동력은 식(3)과 같이 예측할 수 있다.

$$P_a = M_a \times \omega = I_{zz} \times \dot{\omega} \times \omega \tag{3}$$

여기서,  $M_a$ 는 가감속에 필요한 토크이며,  $\omega$ 는 회전속도,  $I_{zz}$ 는 회전관성모멘트이다. 가감속 구간에서의 순간적인 피크 값은 이에 해당한다. 가공에 따른 에너지 소비에 관한 사항은 다음 장에서 자세히 소개한다.

3.2 주축의 손실동력 예측

기계적 손실의 대부분은 베어링 부분의 마찰토크에 의하여 발생하게 된다. 구름베어링의 마찰해석에 관한 연구를 바탕으로 하중 및 속도 그리고 윤활제의 특성이 주어진 경우에 대하여 이러한 조건들을 이용하여 신뢰성 있는 토크 값을 계산할 수 있는 실험식을 사용하였다. 최적의 실험식을 유도하기 위해 현재 알려진 Harris등에 의해 제시되어 있는 마찰 토크의 계산 방법들을 사용하였다.<sup>3</sup> Harris가 제시한 마찰 토크 계산식에 대해 주어진 하중조건과 윤전조건으로 수식을 전개하고 마찰 토크의 값을 계산하였다. 마찰 토크는 다음 식(4)와 같이 나타내어진다.

$$M_1 = f_1 \cdot F_p \cdot d_m \tag{4}$$

여기서,  $f_1$ 은 베어링의 내부설계 및 상대적인 베어링 하중에 의존하는 상수이며, 식(5)와 같이 계산

된다.

$$f_1 = z \cdot \left( \frac{F_s}{C_s} \right)^y \tag{5}$$

여기서,  $F_s$ 는 정적 등가하중이며,  $C_s$ 는 기본 정적격하중이며,  $z$  및  $y$ 는 각접촉 볼베어링의 형상 및 접촉각에 따른 형상데이터이다.<sup>4</sup>

중간속도 영역에서 작동하는 베어링에 대해 Palmgren은 전동체가 베어링 내부 자유공간에 있는 점성윤활제를 헤쳐나갈 때 발생하는 베어링의 마찰토크를 예측하는 다음의 실험식(6), (7)을 사용하였다.<sup>5</sup>

$$v_0 \cdot n \geq 2,000: M_v = 10^{-7} \cdot f_0 \cdot (v_0 \cdot n)^{2/3} \cdot d_m^3 \tag{6}$$

$$v_0 \cdot n < 2,000: M_v = 160 \cdot 10^{-7} \cdot f_0 \cdot d_m^3 \tag{7}$$

여기서,  $v_0$ 는 센티스토크(centistoke)로 주어지며,  $n$ 은 회전속도(rpm)이다. 위 식에서  $f_0$ 는 베어링타입과 윤활방법에 의해 결정되는 상수이다.

하중과 속도조건에서 베어링에 대한 신뢰할 수준의 마찰토크는 식(8)과 같이 하중에 의한 마찰토크와 점성 마찰토크의 합으로 구할 수 있다.

$$M_b = M_1 + M_v \tag{8}$$

$M_l$ 과  $M_v$ 는 실험적인 식에 기초하며 전동체와 케이징 포켓의 미끄럼 효과가 고려되었다. 실험식을 통하여 이에 대한 보정계수를 구할 수 있으며, 손실되는 동력은 식(9)와 같이 구할 수 있다.<sup>4</sup>

$$P_b = M_b \times \omega \tag{9}$$

Fig. 9는 스피들 모터에서 발생하는 에너지 흐름을 나타낸다. 전동기에서 발생하는 손실은 전기적으로 고정자와 회전자의 동손과 철손, 기계적으로는 베어링 마찰손, 풍손 등의 손실들이다. 이러한 손실들이 발열특성에서 전동기 각부의 온도가 상승하는 원인이 된다. 이 중 주된 손실은 동손과 철손이며, 가장 큰 비중을 차지하는 손실은 동손이다. 유도전동기에서 동손은 고정자 권선부와 회전자 도체 바의 저항 손실이며, 철손은 고정자와 회전자의 철심에서 발생하는 와전류손과 히스테리시스손 등의 자기적 리액턴스 손실이다.

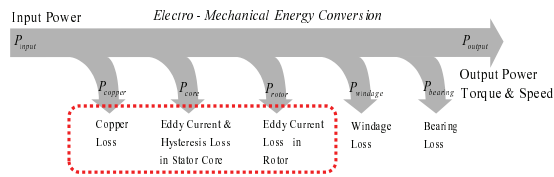


Fig. 9 Schematic diagram for power loss of the spindle motor

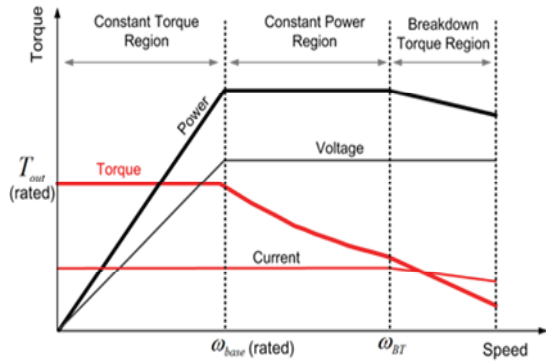


Fig. 10 Speed-Torque diagram of the spindle motor

Fig. 10은 VVVF 인버터로 운전되는 유도전동기의 속도-토크 출력곡선이다. 유도전동기의 운전영역은 일정토크영역, 일정출력영역, 특성영역으로 구분된다. 일정토크영역은 그림같이 기준 속도 이하의 영역에서 전압과 주파수를 일정하게 상승시켜(V/f제어) 출력은 증가하게 되고, 자속을 일정하게 유지시켜 전류는 일정하게 유지되어 일정한 토크로 운전하는 영역이다. 일정출력영역, 특성영역은 약계자(Field Weakening Region) 영역으로 불리며, 기준속도 이상에서 운전되는 영역이다. 공작기계 스피들용 유도전동기의 경우 기준속도 이하의 영역에서 주로 운전되기 때문에 일정토크영역 내에서 부하조건에 따른 손실을 계산한다. 이를 위해 등가회로 해석을 통한 스피들 모터의 토크-속도 특성을 분석한다. 또한, 부하조건을 고려한 발열량 계산은 무수히 많은 운전점에 대한 손실값을 계산해야 하기 때문에 현실적으로 발열량 예측이 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 반응표면법을 사용하였다.<sup>6</sup> 대상이 되는 여러 가지 형태의 속도-토크 특성을 갖는 스피들용 유도전동기 모델들의 정보를 분석하고, 각각의 모델에 대한 형상 예측설계, 속도-토크 특성 및 손실을 계산하여 토크 특성 및 손실에 대한 특성을 비교 분석한 결과를 Fig. 11에 도시하였다.<sup>6</sup>

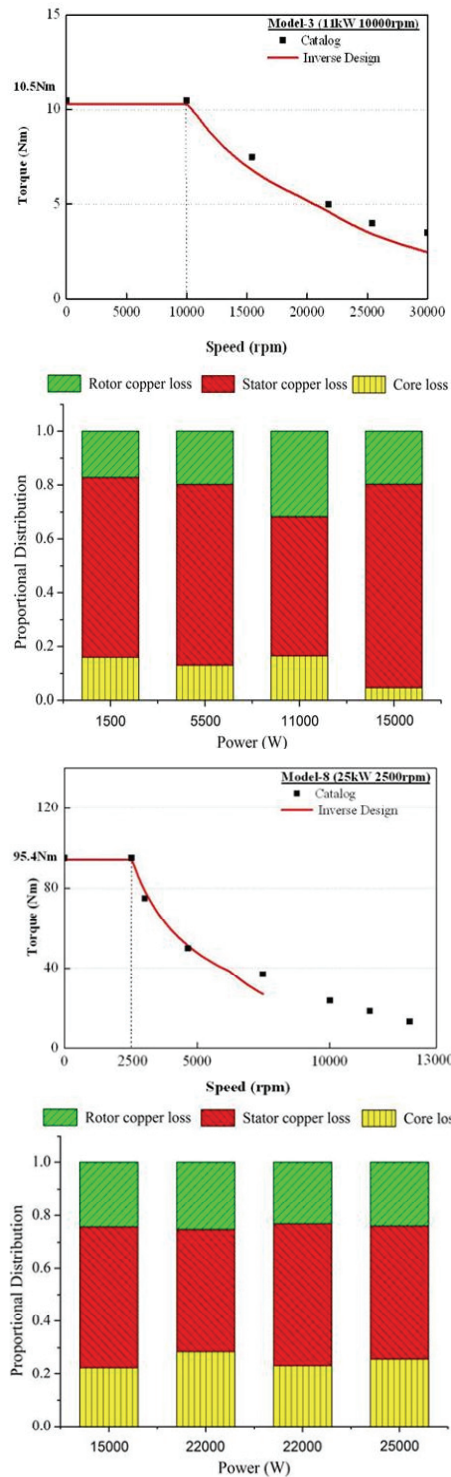


Fig. 11 Estimation results of power characteristic and loss of the spindle motor

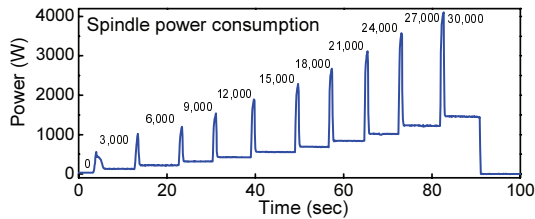


Fig. 12 Experimental results of power consumption

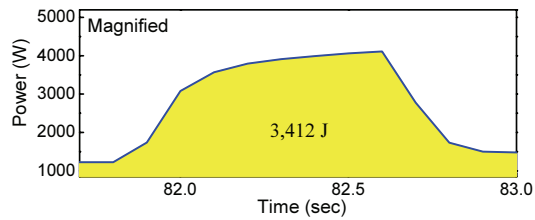


Fig. 13 Power consumption at rising time of 30,000 rpm

3.3 주축 소비에너지 측정 실험

Fig. 12는 모터 입력단의 소요동력을 실험적으로 측정한 결과이다. 0~30,000 rpm 까지 단계적으로 속도를 올렸으며, 그림에서 보이는 바와 같이 속도상승 구간에서 스파이크(spike)처럼 올라오는 값이 식(3)에 의하여 나타나는 가속에 소요되는 사용동력과 베어링과 모터에서 발생하는 약간의 손실동력을 포함하고 있다. 등속 운전구간에서는 소요동력이 일정하게 유지됨을 알 수 있으며, 속도의 증가에 따라 그 크기가 증가함을 알 수 있다. 이는 식(9)에 나타난 바와 같이 소요동력이 마찰토크와 속도의 곱에 비례하기 때문이다.

Fig. 13은 30,000 rpm으로 가속하는 구간을 확대한 그림이며, 이 때의 소비 에너지는 3,412 J 이다. 정속구간에서의 소요동력은 1,460 W이며, 이를 비교하여 각 속도 구간에서 에너지를 저감하기 위한 속도패턴을 생성시킬 수 있다. 가속에 필요한 에너지보다 정속구간에 소모되는 에너지가 클 경우 적절한 속도와 가감속을 조절하는 방식으로 구현이 가능함을 알 수 있다.

4. 밀링가공에서의 절삭 소비에너지 예측

절삭가공 시 공구는 저항을 받게 된다. 이 절삭부하하는 가공기의 소비에너지를 증가시키며, 에너지 절약의 관점에서 무시할 수 없는 요소이다. 그러므로, 특정 가공을 수행할 때 공작기계의 소비에너지를 분석하기 위해서는 가공부하에 따른

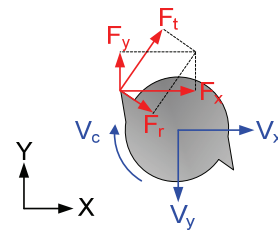


Fig. 14 Cutting force and velocity for cutting power calculation

절삭동력을 고려하여야 한다. 본 장에서는 밀링가공에서의 절삭력과 절삭동력 및 소비에너지를 예측하는 시뮬레이션 기법을 제안한다.

절삭동력은 절삭저항과 절삭방향으로의 공구와 공작물과의 상대속도의 곱에 비례한다. 절삭저항은 주축과 X, Y축 등 이송축에 작용되어 소비에너지를 증가시킨다. Fig. 14는 밀링가공에서 공구에 작용하는 절삭력과 절삭속도(cutting speed) 및 이송속도(feedrate)를 보여준다. 이 때, 절삭가공 시 주축의 회전에 의해 소비되는 절삭동력  $P_s$ 는 식(10)과 같다. 여기서,  $F_t$ 는 공구날의 접선방향으로 작용하는 절삭력이며,  $V_c$ 는 절삭속도를 나타낸다. 또한, 절삭력에 의한 이송축의 소요 동력은 이송속도와 이송방향으로의 절삭력의 곱으로 계산되며, X, Y이송축의 절삭동력  $P_x, P_y$ 는 식(11), (12)와 같다. 여기서,  $V_x, V_y, F_x, F_y$ 는 각각 X, Y 방향의 이송속도와 절삭력을 나타낸다.

$$P_s = F_t \cdot V_c \tag{10}$$

$$P_x = F_x \cdot V_x \tag{11}$$

$$P_y = F_y \cdot V_y \tag{12}$$

4.1 절삭력 예측 시뮬레이션

위 식(10)-(12)에서 알 수 있듯이, 절삭동력 및 소비에너지를 예측하기 위해서는 가공 시 절삭력을 정확히 예측하는 것이 중요한 요소이다. 최근 밀링가공에서의 가공경로에 따른 절삭력을 효율적으로 계산하는 시뮬레이션 기법이 소개되었다.<sup>7</sup> 절삭력 예측에 대한 기존의 많은 연구들이 슬로팅(slotting)과 같은 정해진 조건에서의 단일 경로, 혹은 코너 등의 국소영역에 대한 절삭력 해석을 수행하였다. 하지만 실제 가공에서는 경로의 교차, 축방향 및 반경방향 절삭깊이의 변화, 커슱(cusp)

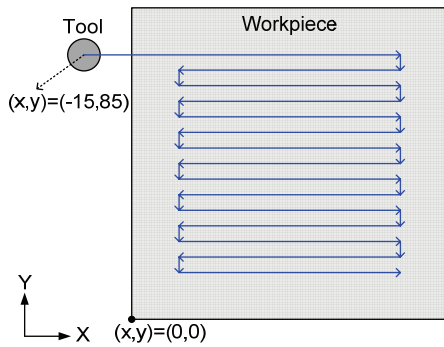


Fig. 15 Tool paths applied to the simulation

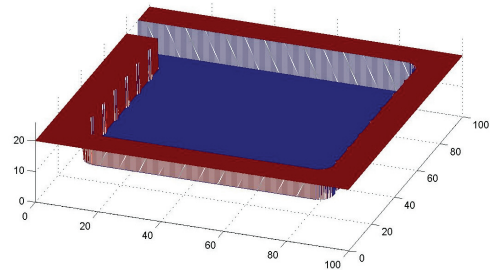
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Values
Tool	$\phi$ 10mm, 4 flute end-mill, Helix angle 30°
Workpiece	Aluminum 2014-T6
Spindle speed	1000 rpm
Feedrate	50-250 mm/min
Depth of cut	10 mm
Mesh size	50 $\mu$ m
Simulation step time	3 ms (1/20 revolution)

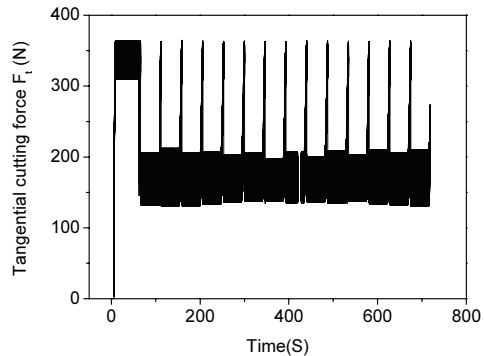
등에 의해 절삭영역이 다양하게 변하게 된다. 발표된 절삭력 시뮬레이션은 위와 같은 한계를 극복하고 일반적인 NC 가공을 시뮬레이션 하기 위해, 가공물의 초기 형상, 가공 경로, 공구의 형상, 가공 조건을 입력받아 밀링가공을 기하학적으로 시뮬레이션하고, 가공경로에 대한 세 축방향의 절삭력을 빠르게 계산한다. 가공물의 초기 형상은 CAD 소프트웨어에서 만들어진 STL 형식의 솔리드 모델을 사용하며, 가공경로는 CAM 소프트웨어에서 생성된 NC코드를 사용함으로써 복잡한 경로의 실제 가공을 시뮬레이션할 수 있다. 가공물의 형상을 나타내기 위해 복셀(voxel) 알고리즘을 사용하였으며, 매 시뮬레이션 순간 공구날에 의해 제거되는 복셀 요소점들을 시뮬레이션하여 가공재료의 제거 및 미변형 칩두께(uncut chip thickness)를 계산한다. 본 연구에서는 이 절삭력 시뮬레이션 기법을 통해 계산된 절삭력을 이용하여 절삭동력 및 소비에너지를 시뮬레이션하였다.

**4.2 절삭동력 및 소비에너지 예측 시뮬레이션**

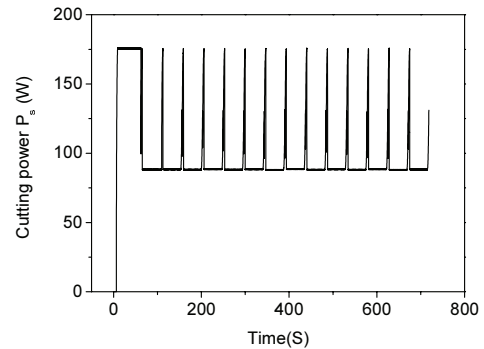
밀링가공 시 이송속도에 따른 주축의 절삭동력 및 소비에너지를 알아보기 위하여 시뮬레이션을



(a) Simulated workpiece



(b) Simulated cutting force ( $F_t$ )



(c) Simulated cutting power of a spindle ( $P_s$ )

Fig. 16 Simulated workpiece shape, cutting force ( $F_t$ ) and cutting power ( $P_s$ ) (feedrate 100 mm/min)

수행하였다. Fig. 15는 시뮬레이션에 적용된 가공경로를 보여주며, 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다. 이송속도를 50 mm/min와 250 mm/min 사이에서 50 mm/min 씩 증가시키면서 각각 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 16(a)는 이송속도 100 mm/min로 가공 시 시뮬레이션으로 예측된 가공형상을 보여준다. Fig. 16(b)는 공구의 접선방향으로 작용하는 절삭력  $F_t$ 를 보여준다. X축 방향의 이송 시에는 측벽 가공(side milling)을 수행하지만, Y축 방향 이송 시에는

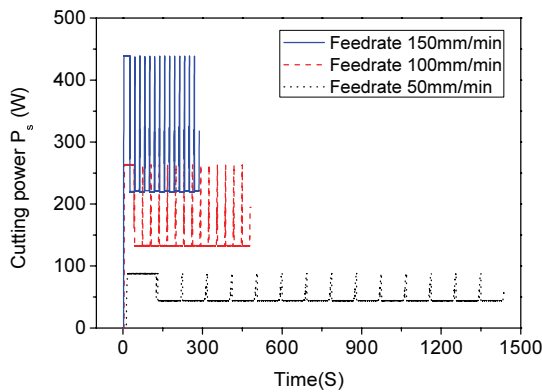


Fig. 17 Influence of the feedrate on cutting power ( $P_s$ )

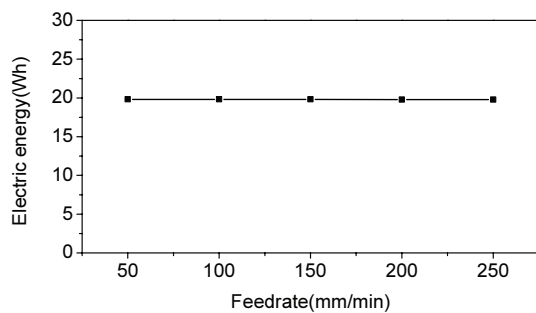


Fig. 18 Influence of the feedrate on cutting energy consumption of a spindle

에는 슬롯팅(slotting)을 수행하기 때문에 절삭력이 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 16(c)는 예측된 절삭력  $F_t$  의 공구 1회전 당 평균 절삭력을 이용하여 계산된 절삭동력  $P_s$  를 나타낸다. 가공 중 주축 회전수가 변하지 않았으며 절삭속도  $V_c$  가 일정하기 때문에 절삭동력  $P_s$  는 절삭력과 비례함을 알 수 있다.

Fig. 17은 가공 시 이송속도에 따른 스피들의 절삭동력  $P_s$  를 비교한 결과이다. 이송속도가 커질수록 가공시간은 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한, 이송속도가 커질수록 절삭력이 커지기 때문에 소비동력은 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 18은 각 이송속도에서의 절삭에 의한 스피들의 소비에너지를 보여준다. 이송속도의 증가는 가공시간을 단축시키지만 절삭력을 증가시키므로 에너지는 동일하게 소비되는 것을 알 수 있다. 하지만 가공시간이 증가할수록 장비 전체의 기본 소비전력이 증가하기 때문에 이송속도를 빠르게 하여 가공시간을 줄이는 것이 에너지 절약 측면에서 유리하다.

### 5. 결론

본 연구에서는 공작기계에서의 절삭가공 시 주축과 이송계의 소비에너지를 예측하기 위한 시뮬레이션 기법을 개발하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 이송시스템의 가감속 운동에너지를 예측하기 위하여 NC 데이터로부터 위치, 속도, 가속도, 저크를 추출하고, 이송질량과 안내면의 마찰력을 고려해서 소비 동력과 에너지를 계산하였다.
- 2) 공작기계 주축의 소비동력 및 에너지를 예측하기 위하여 가감속에 필요한 에너지, 베어링 마찰, 내장형 모터의 손실량을 고려하여 예측모형을 개발하였으며, 이를 실험적으로 확인하였다.
- 3) 밀링가공에서의 공구 이송에 따른 절삭력과 재료 제거에 필요한 절삭동력 및 에너지를 예측하기 위하여 복셀 알고리즘을 이용한 기하 시뮬레이션 기반의 예측 모델을 개발하였으며, 이를 통해 가공 시 이송속도에 따른 주축의 절삭동력 및 소비에너지를 계산하였다.

### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업융합원천기술 개발 사업인 “에너지 소비량 10% 이상 저감된 5축 머시닝센터 기반 복합가공기 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

### REFERENCES

1. Altintas, Y., “Manufacturing Automation,” Cambridge University Press, 2<sup>nd</sup> Ed., pp. 213-249, 2012.
2. Whalley, R., Ebrahimi, M., and Abdul-Ameer, A., “Hybrid Modelling of Machine Tool Axis Drives,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, No. 14, pp. 1560-1576, 2005.
3. Harris, T. A. and Kotzalas, M. N., “Rolling Bearing Analysis,” CRC Press, 5<sup>th</sup> Ed., 2006.
4. Kim, K. S., Hwang, J., Lee, D. W., Lee, S. M., and Lee, S. J., “Study on the Frictional Torque in the Angular Contact Ball Bearing for Machine Tool Spindle by Empirical Formula,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 2, pp. 149-157, 2015.
5. Palmgren, A., “Ball and Roller Bearing Engineering,” Burbank, 3<sup>rd</sup> Ed., pp. 34-41, 1959.



6. Seong, K.-H., Cho, H.-W., Hwang, J., and Shim, J., "Thermal Characteristic Analysis of Induction Motors for Machine Tool Spindle for Motion Error Prediction," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 2, pp. 141-147, 2015.
7. Heo, S., Lee, C.-H., and Park, C. H., "Cutting Force Simulation in the NC Milling Process," Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Positioning Technology, pp. 462-464, 2014.