

엔드밀링 공구의 유한요소해석을 통한 이송속도 스케줄링의 기준 절삭력 산출

이한울*, 조동우+

Calculation of a reference force for feedrate scheduling using the FEM analysis of a
tool

Han Ul Lee*, Dong-Woo Cho+

Abstract

Off-line feedrate scheduling is presented as the advanced technology to regulate cutting forces at the desired level through change of feedrates. In rough cutting, the feedrate scheduling aims at reducing the machining time, which is the most important factor for better productivity. Thus, the largest force which can avoid breakage of tool shank and tooth is a reference force for feedrate scheduling in rough cutting. In this paper, a calculation method of the reference cutting force for feedrate scheduling is developed. This model calculates rupture plane of tooth using the FEM analysis of a tool and computes the reference force using the transverse rupture strength of a tool. Experiments validate that the presented feedrate scheduling model reduced machining time drastically and regulate cutting forces at the reference cutting force.

Key Words : Feedrate Scheduling(이송속도 스케줄링), Reference Cutting Force(기준 절삭력), FEM Analysis(유한요소 해석), Cutting Force Model(절삭력 모델), Transverse Rupture Strength(항절력)

1. 서론

다품종·소량 생산 방식의 산업 흐름에 따라 CNC 가공

에서는 생산성 향상을 위한 최적의 절삭조건을 선정하는
기술이 요구되어지고 있으며, 그 일환으로 이송속도 스케
줄링의 필요성이 점차 부각되고 있다. 국내외에서 개발된

* 발표자, 포항공과대학교 기계공학과 (polarb@postech.ac.kr)
주소: 790-784 경북 포항시 남구 효자동

+ 포항공과대학교 기계공학과

이송속도 스케줄링 모델은 소재 제거량(Material removal rate)을 조절하는 방식^{[1][2]}과 절삭력을 예측하여 이를 조절하는 방식^[3-5]이 있다. 소재 제거량을 기준으로 할 경우에는 공구에 가해지는 힘을 정확하게 예측할 수 없으며 다양한 가공에 적용하기 위한 데이터베이스 구축이 어렵다. 따라서 효과적이고 신뢰할 수 있는 이송속도를 얻기 위하여 절삭력 예측을 기반으로 이송속도를 스케줄링 하는 연구가 주로 진행되고 있다.

이송속도 스케줄링은 생산성을 향상시키기 위하여 일정한 절삭력이 발생하도록 이송속도를 조절하는 것이다. 황삭 가공에서는 가공 시간을 단축하기 위하여 공구가 파손되지 않는 범위 내에서 최대 절삭력이 발생하도록 한다. 정삭 가공에서는 가공 오차를 원하는 수준 이하가 되도록 하는 절삭력이 발생하도록 한다. 따라서 효과적인 이송속도 스케줄링을 위해서는 적절한 기준 절삭력을 선택하는 것이 매우 중요하다. 이송속도 스케줄링에 대한 일련의 연구에서 기준 절삭력이 고려되었다. Fussell 등^[4]은 절삭력에 의한 공구의 변형을 고려하여 공구의 최대 변형량을 제한하도록 함으로써 이송속도를 스케줄링 하였다. Bae 등^[6]과 Guzel 등^[7]은 일정한 기준 절삭력을 경험적인 값으로 결정하고 전체 공구 경로에서 정해진 절삭력이 발생하도록 이송속도를 스케줄링 하였다. Ko 등^[8]은 공구의 항절력(Transverse Rupture Strength)을 이용하여 공구의 몸체가 부러지는 힘과 공구의 날이 파손되는 힘을 계산하고 이를 기준 절삭력으로 사용하였다.

본 논문에서는 Ko 등이 제시한 공구의 항절력을 이용하여 기준 절삭력을 계산하여 이송속도 스케줄링을 수행하였다. FEM 해석을 통하여 각각의 절삭 조건에서 공구의 파단면의 넓이를 정확히 계산하였으며, 이를 이용하여 공구의 파손이 일어나지 않도록 하는 기준 절삭력을 결정하였다. 개발된 기준 절삭력 산출 방법으로 얻어진 기준 절삭력을 기준으로 포켓 가공의 이송속도를 스케줄링 함으로써 개발된 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 기준 절삭력

2.1 항절력을 이용한 기준 절삭력

이송속도 스케줄링은 가공 시 전체 NC 코드에서 주어진 기준 절삭력이 발생하도록 이송속도를 조절한다. 본 논문에서는 황삭 가공을 위하여 공구의 파손이 일어나지 않도록 하는 최대 절삭력을 기준 절삭력으로 사용하였다. 공구 회



Fig. 1 Schematic diagram for determination of a reference cutting force to avoid breakage of tool shank[8].

사에서 제시하는 공구의 항절력을 이용하여 식 (1)과 같이 두 가지 기준 절삭력을 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} RF_1 &= SF \cdot TRS \cdot S_1 \\ RF_2 &= SF \cdot TRS \cdot S_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, RF_1 은 그림 1과 같이 공구의 몸체가 부러지는 것을 방지하기 위해 설정하는 기준 절삭력이고, RF_2 는 공구의 날 끝 부분이 파손되는 것을 막기 위해 추가하는 기준 절삭력이다. SF 는 안전계수이다. S_1 은 날 부의 등가 단면적이며, S_2 는 공구의 치핑(Chipping)이 발생하는 위치에서 파단면의 넓이를 나타낸다. S_1 은 공구의 등가 반경을 이용하여 구할 수 있으며, 공구 반경이 R 일 경우 엔드밀의 등가 반경은 $0.79R$ 이다. S_2 의 넓이는 유한요소해석을 통하여 구한다.

2.2 공구의 치핑 파단면 해석

공구의 날 끝 부분이 파손되는 것을 방지하기 위한 기준 절삭력을 얻기 위해서는 치핑이 발생하는 파단면의 넓이를 계산하여야 한다. 정확한 파단면의 넓이를 계산하기 위하여 엔드밀 공구에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 공구의 형상과 항절력은 표 1과 같으며, SolidWorks를 이용하여 공구를 모델링하고, ANSYS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였고, 다음과 같은 가정 적용하였다.

Table 1 Cutter geometry and TRS.

Parameter	Value
Radius	5 mm
Helix angle	30 degree
Rake angle	13 degree
Primary clearance angle	13 degree
Primary clearance width	1 mm
Secondary clearance angle	30 degree
Secondary clearance width	1 mm
TRS	3000 MPa

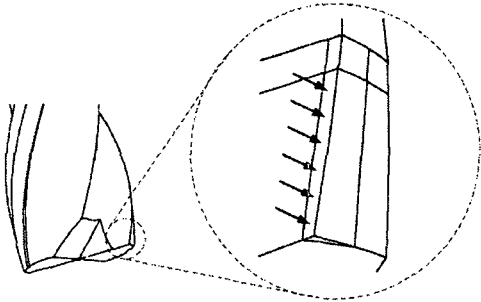
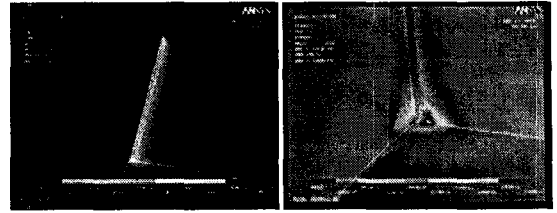


Fig. 2 Assumptions for FEM analysis.

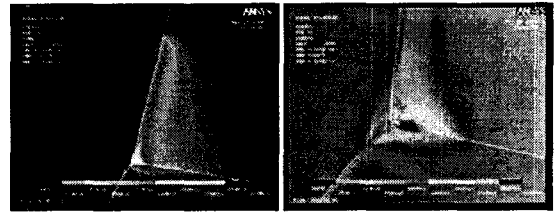
- 1) 절삭날의 파손은 상면경사면(Rake face)에 수직으로 가해지는 수직 절삭력에 의하여 발생한다.
- 2) 절삭력은 일정 부분에 집중되지 않고, 압력의 형태로 미변형 칩두께 만큼의 영역에 동일하게 가해진다.
- 3) 한 회전각에서는 높이에 관계없이 미변형 칩두께는 같다.
- 4) 수직 절삭력에 의하여 상면경사면에 가해지는 압력은 높이에 관계없이 일정하다.

그림 2와 같이 높이에 관계없이 같은 미변형 칩두께의 영역에 일정한 압력을 가함으로써 유한요소해석을 수행하였다. 실제로는 절삭에 참여하고 있는 공구의 가장 아래 부분과 가장 위 부분에서 비틀림각에 따라 최대 10% 정도 미변형 칩두께의 차이가 발생하지만 가정에 따라 같은 폭을 적용하였다. 5.52MPa의 압력을 가하고, 미변형 칩두께를 0.01mm에서 0.1mm까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석 결과는 그림 3과 같으며 다음과 같이 정리할 수 있다.

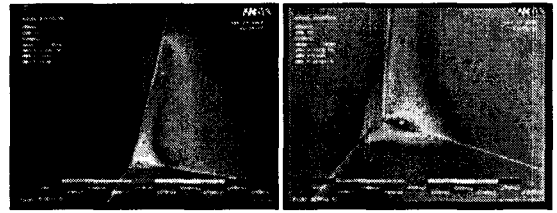
- 1) 공구 칩핑의 파단면은 그림 4와 같다.
- 2) 하중은 상면경사면을 따라 형성되는 삼각기둥 부분과 공구 바닥 면에서 형성되는 사면체 부분에 집중된다.
- 3) 삼각기둥 부분과 사면체 부분의 크기는 미변형 칩두께의 크기에 따라 일정하게 증가한다.
- 4) 절삭 깊이는 삼각기둥부분의 높이에만 영향을 주고 사면체부분에는 영향을 주지 않는다.
- 5) 상면경사면에 수직인 방향으로 하중이 전달되어 일정한 길이 내에 같은 집중 하중이 작용한다. 공구의 바닥 면에서는 하중이 더 이상 전달되지 못하므로 바닥 면에 집중된다. 따라서 상면경사면 바로 뒤의 공구의 바닥 면에 가장 많은 하중이 집중된다.



(a) 0.010mm



(b) 0.050mm



(c) 0.100mm

Fig. 3 FEM analysis results with respect to uncut chip thickness.

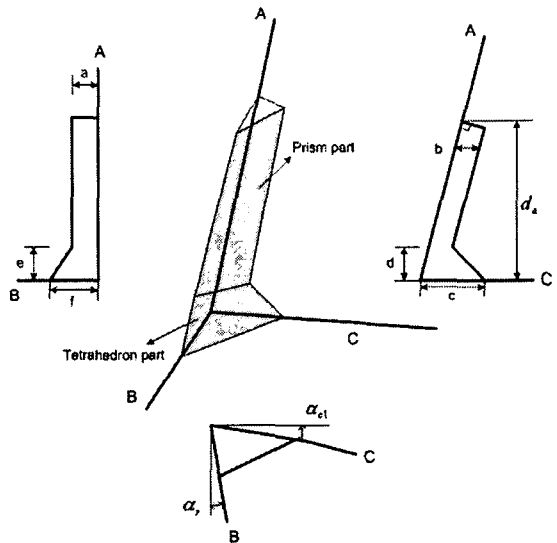


Fig. 4 Transverse rupture plane

해석 결과를 이용하여 그림 4의 파단면의 넓이를 계산하

면 식 (2)과 같다.

$$S_2 = S_{it} + S_{ut} \quad (2)$$

여기서, S_{it} 와 S_{ut} 는 각각 사면체와 삼각기둥으로 만들어진 파단면의 넓이이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{it} = \frac{1}{2} oq \cdot \sin \theta_i \left(1 - \frac{ba}{cf}\right)$$

$$S_{ut} = \frac{1}{2} m(l+n)$$

$$o = \sqrt{\left(\frac{cd}{c-b}\right)^2 + c^2 - 2c^2 \frac{d}{c-b} \cos \theta_h}$$

$$p = \sqrt{f^2 + c^2 - 2cf \cdot \cos(90 - \alpha_r - \alpha_{cl})}$$

$$q = \sqrt{\left(\frac{cd}{c-b}\right)^2 + f^2}$$

$$\cos \theta_i = \frac{p^2 - o^2 - a^2}{2oq}$$

$$l = \frac{d_a}{\sin \theta_h} - \frac{cd(f-a)}{f(c-b)}$$

$$m = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(90 - \alpha_r - \alpha_{cl})}$$

$$n = \frac{d_a}{\sin \theta_h} - b \cdot \cos \theta_h - d$$

해석 결과로부터 각 변수의 값을 근사화하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} a &= t_c \\ b &= 2.4711t_c + 0.0049 \\ c &= 4.4046t_c + 0.0065 \\ d &= 2.0974t_c + 0.0004 \\ f &= 1.0892t_c + 0.001 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, t_c 는 미변형 칩두께이다.

2.3 치핑 방지를 위한 기준 절삭력

식 (1)과 (2)를 이용하여 임의의 크기의 치핑이 발생하는 데 필요한 힘을 계산할 수 있다. 즉 파손되는 공구 날의 최대 크기를 결정하면 이를 위한 기준 절삭력을 계산할 수 있다. ISO 8688-2에서는 마모로 인하여 공구의 수명이 다하는 조건으로 여유면 마모(Flank wear)가 일정할 경우에는

평균 0.3mm, 일부분에서 일어날 경우에는 최대 0.5mm가 발생하는 경우로 결정하였다. 그러나 마모의 경우에는 성장 속도가 일정하고, 공구에 부담을 주지 않는 상태에서 진행되므로 허용 치핑의 크기는 이보다 작은 값을 적용하여야 한다. 본 논문에서는 허용 치핑의 크기를 평균 0.1mm, 최대 0.2mm로 적용하였고, 치핑의 크기가 이보다 작도록 기준 절삭력을 결정하였다. 그림 4에서 평균 여유면 치핑은 b , 최대 여유면 치핑의 크기는 c 와 같으므로 b 는 0.1mm, c 는 0.2mm가 넘지 않도록 기준 절삭력을 결정하였다.

3. 이송속도 스케줄링

3.1 절삭력 예측을 통한 이송속도 스케줄링

이송속도 스케줄링은 그림 5와 같은 과정을 통해 이루어진다. 먼저 NC code를 읽어 들이고, NC code에 따라 공구를 이동시키면서 공구와 공작물 간의 접촉영역을 해석하고 절삭 해석 정보(Cutting configurations)를 계산한다. 계산된 절삭 해석 정보를 이용하여 NC 가공에 대한 절삭력 예측을 수행하며, 절삭력의 변화 정도에 따라 NC 코드를 분할하여 최적의 이송속도를 입력함으로써 이송속도 스케줄링이 이루어진다. 최적의 이송속도를 구하기 위하여 각각의 절삭 조건에 따른 기준 절삭력이 계산되며, 기준 절삭력이 발생할 수 있도록 이송속도를 조절한다. 본 논문에서는 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 이용한 절삭력 모델^{[8][10]}을 사용하여 CNC 가공의 절삭력을 예측하였으며, F_x 와 F_y 의 최대 합력이 기준 절삭력이 되도록 이송속도를 조절함으로써 이송속도 스케줄링^{[5][8]}을 수행하였다. 기준 절삭력은 식 (1)의 RF_1 과 RF_2 가운데 작은 값이 사용된다. 이송속도 스케줄링을 통하여 NC 코드의 모든 블록에서 항

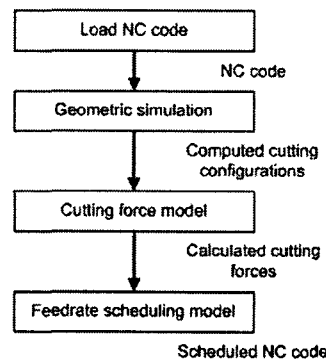


Fig. 5 Procedure for feedrate scheduling[9].

상 일정한 절삭력이 발생하게 됨으로써, 높은 생산성 향상 효과를 얻을 수 있다.

3.2 적용 결과

개발된 기준 절삭력 모델을 검증하기 위하여 그림 6과 같은 형상의 포켓 가공에 대한 이송속도 스케줄링을 수행하였다. 표 1과 같은 평 엔드밀을 이용하여 포켓가공을 수행하였고, 사용된 시편은 SKD41 (HRC30)이다. 주축 회전수는 1000rpm, 초기 이송속도는 100mm/min이다. 절삭 깊이는 2mm, 오프셋량은 1mm이며, 공구 경로는 그림 6과 같다. 절삭력 모델을 검증하기 위하여 초기 이송속도에서의 절삭력을 예측하였고, 그림 7과 같이 포켓 가공의 절삭력을 적절히 예측하고 있음을 확인하였다.

이송속도 스케줄링은 경험에 의한 임의의 값인 300N과 공구의 파단면을 예측하여 구해진 값을 기준 절삭력으로 사용하여 수행하였다. 그림 8은 스케줄링 후의 3번 경로에 대한 이송속도이며, 그림 9는 각각의 스케줄링 전·후의 절삭력 측정값이다. 300N을 기준 절삭력으로 사용한 경우와 공구 치핑을 기준으로 하였던 두 가지 경우 모두 스케줄링 후 절삭력을 일정하게 원하는 값으로 조절하고 있음을 확인할 수 있다. 300N을 기준으로 하였을 때에는 33%, 공구 치핑을 기준으로 한 경우에는 74%의 가공 시간 단축 효과를 얻었고, 두 경우 모두 공구의 파손은 발생하지 않았다. 개발된 기준 절삭력 모델은 공구를 파손시키지 않으면서 가공 시간을 최소화 시켜주고 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 이송속도 스케줄링을 위한 적절한 기준 절

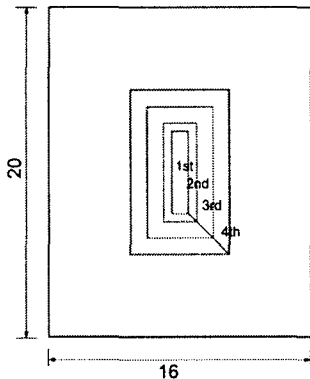


Fig. 6 Workpiece geometry and tool path.

삭력을 계산 모델을 개발하였다. 황삭 가공을 위한 기준 절삭력은 공구의 몸체가 부러지지 않고, 날 부분에서의 치핑이 발생하지 않도록 하는 최대값을 사용한다. 일정한 크기 이상의 치핑이 발생하지 않도록 하는 절삭력의 최대값을 얻기 위하여 FEM 해석을 통해 절삭 시 하중이 집중되는 단면

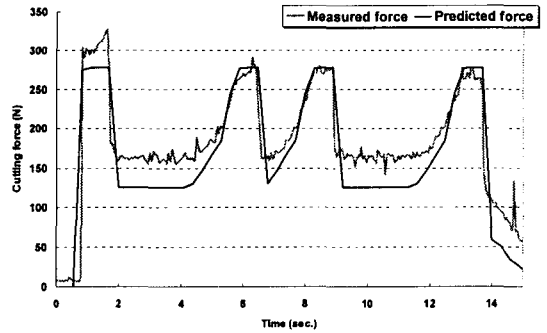


Fig. 7 Comparison between measured and predicted maximum cutting force for 3rd loop.

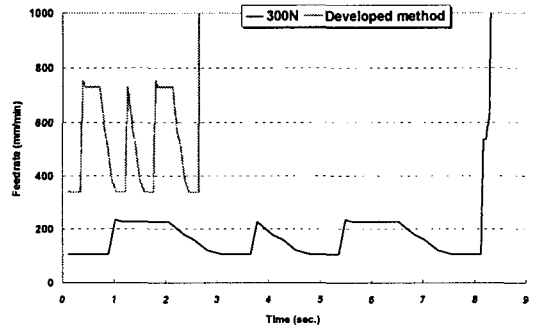


Fig. 8 Scheduled feedrate for 3rd loop.

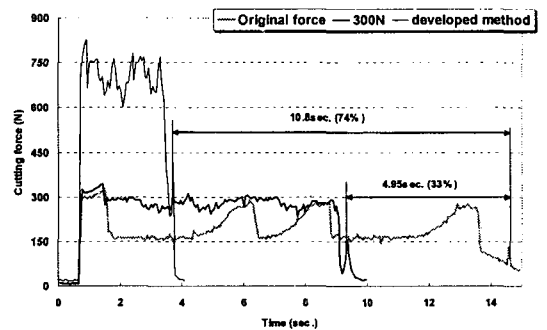


Fig. 9 Comparison of maximum cutting force before/after feedrate scheduling for 3rd loop.

의 넓이를 계산하였고, 공구의 항절력을 이용하여 기준 절삭력을 계산하였다. 개발된 기준 절삭력 모델을 검증하기 위하여 포켓 가공의 이송속도 스케줄링을 수행하였고, 스케줄링 후 절삭력은 기준 절삭력 값으로 일정하게 유지되며 허용된 범위 내에서만 공구의 파손이 일어남을 확인하였다.

개발된 기준 절삭력을 이용한 이송속도 스케줄링은 공작기계 사용자에게 최적의 절삭 조건을 제공해 주기 때문에 초보자도 쉽게 높은 생산성과 안정적인 가공을 수행할 수 있도록 할 것이다.

후 기

본 연구는 (주)티보테크 주관의 2003년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) <http://www.cgtech.com>
- (2) K. W. Lee, S. D. Noh, D. M. Sheen, H. S. Hahn, 2000, "NC Code Post-Processor Considering Metal Removal Rate," *J. Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 116-123.
- (3) Y. S. Tarn, Y. Y. Shyur, B. Y. Lee, 1995, "Computer-added Generation of the Cutting Conditions in Pocket Machining," *J. of Materials Processing Technology*, Vol 51, pp. 223-234.
- (4) B. K. Fussell, R. B. Jerard, J. G. Hemmett, 2001, "Robust Feedrate Selection for 3-Axis NC Machining Using Discrete Models," *J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, pp. 213-224.
- (5) H. U. Lee, D. W. Cho, 2003, "An Intelligent Feedrate Scheduling Based on Virtual Machining," *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, pp. 873-882.
- (6) S. H. Bae, K. H. Ko, B. H. Kim, B. K. Choi, 2003, "Automatic feedrate adjustment for pocket machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 495-500.
- (7) B. U. Guzel, I. Lazoglu, 2004, "Increasing productivity in sculpture surface machining via off-line piecewise variable feedrate scheduling based on the force system model," *Int. J. Machine Tools & Manufactures*, Vol. 44, pp. 21-28.
- (8) J. H. Ko, D. W. Cho, 2004, "Feed rate scheduling model considering transverse rupture strength of a tool for 3D ball-end milling," *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1047-1059.
- (9) 이한울, 고정훈, 조동우, 2004, "CNC 가공의 정밀 절삭 시뮬레이션 및 이송속도 스케줄링 시스템 개발", 한국공작기계학회 2004 춘계학술대회 논문집, 서울, 서울산업대학교, 2004.4.23-24, pp. 370-375.
- (10) W. S. Yun, D. W. Cho, 2001, "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting Condition Independent Coefficients in End Milling," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 4, pp. 463-478.