

2 차원 절삭가공에 대한 강열점소성 유한요소법의 활용

고대철(양산대 메카트로닉스과), 고성림(건국대 기계설계학과), 박태준(부산대 대학원)

Application of the Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method to Orthogonal Cutting Process

D.C.Ko(Mechatronics Dept., YSC), S.L.Ko(Mechanical Eng. Dept., KKU), T.J.Park(Precision Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

The objective of this study is to develop a rigid-thermoviscoplastic finite element program for the analysis of orthogonal cutting process. Deformation of the workpiece material is considered as rigid-viscoplastic and the numerical solution is obtained from the coupled analysis between plastic deformation and temperature field, including treatment of temperature dependent material properties. The chip and the burr formation are simulated for the non-steady state orthogonal cutting using the developed program. To validate the program the predicted results at chip and burr formation stage are compared with the published ones. The case of isothermal cutting process is also considered to study the thermal effect on the machining process.

Key Words : Orthogonal cutting process(2 차원 절삭), Rigid-thermoviscoplastic finite element method(강열점소 유한요소법), Chip formation(칩 형성), Burr formation(버 형성)

1. 서론

유한요소법에 의한 향상된 수치기법을 근거로 보다 현실적인 조건하에서 절삭가공의 변형특성에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. Usui 등[1]은 칩 형상을 가정하여 정상상태의 2 차원 절삭가공을 해석하였고, Iwata 등[2]은 점소성 모델을 활용하여 등온상태하의 절삭가공을 해석하였다. Strenkowski 등[3]은 열전도 해석을 포함한 칩 형성을 예측하였고 Wu 등[4] 정상상태의 2 차원 절삭가공에 대한 열점소성 모델을 제시하였다. 이상에서 언급된 대부분의 연구들은 정상상태의 절삭가공에서 칩 형성 및 온도의 영향을 해석하였으므로 공구진행에 따른 피삭재의 변형과 기계적 상태량의 변화를 예측할 수 없었다. 또한 공구 이탈시 발생하는 버 형성을 예측하기 위해서는 비정상상태의 2 차원 절삭가공에 대한 해석이 필요하다.

본 연구의 목적은 비정상상태의 2 차원 절삭가공에서 절삭속도, 피삭재의 변형에 의한 열생성 및 공구면과 피삭재의 접촉에 의한 마찰열 등이 칩 형성과 버 형성에 미치는 영향을 강열점소성 유한요

소법을 활용하여 관찰하고자 한다. 이를 위해 고속 절삭가공의 시뮬레이션을 위한 전용 유한요소 프로그램 개발하였으며, 이를 이용하여 공구진행에 따른 피삭재의 변형거동을 연속적으로 시뮬레이션 하였다. 칩 형성 및 버 형성에 대한 해석결과와 타당성을 검증하기 위해 피삭재 내부의 유효변형률 분포, 온도분포, 절삭저항의 변화 등을 이전의 연구결과와 비교해 보았다.

2. 이론적 배경

2.1 강점소성 유한요소법

2 차원 절삭가공의 변형해석을 위해 강점소성 유한요소법을 이용하였다. 이의 수식화과정은 많은 문헌[5]에 잘 알려져 있으므로, 간략하게 언급한다. 강점소성 재료에 대한 범함수(functional), π 는 다음과 같다.

$$\pi = \int E(\dot{\epsilon}_{ij})dV - \int \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K를 도입하면, 식(1)에 대한 일차

변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int \dot{\epsilon}_x \delta \dot{\epsilon}_x dV - \int \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

위의 식(2)는 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우튼-랩슨법(Newton-Rapshon method)을 이용하여 해를 구한다.

2.2 온도장의 유한요소해석

2 차원 절삭가공 동안의 온도장 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 방정식이다.

$$k_1 T_{,ii} + \dot{r} - \rho c \dot{T} = 0 \quad (3)$$

위의 식(3)을 변분원리에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$\int k_1 T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int \rho c \dot{T} \delta T dV - \int \kappa \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \delta T dV - \int q_n \delta T dS = 0 \quad (4)$$

위의 식(4)를 유한요소 분할화한 뒤 유한차분 근사에 의해 선형화하여 온도장을 구한다. 또한 본 연구에서의 온도장은 변형해석의 결과와 연계(coupled)하여 계산된다.

2.3 칩 및 버 형성 예측기법

강열점소성 유한요소법에 의한 비정상상태의 절삭가공 해석에서 공구 인선부 주위의 칩 형성부와 가공면 처리를 위해 Fig. 1 과 같이 Ueda 등[6]이 제시한 기하학적 조건을 이용하였다. 공구가 진행함에 따라 공구 인선부로부터 적정거리에 위치한 공작물의 절점, I는 칩으로 형성되는 절점과 가공면으로 형성되어 공구와 접촉하는 2 개의 절점, J 와 K로 분리된다.

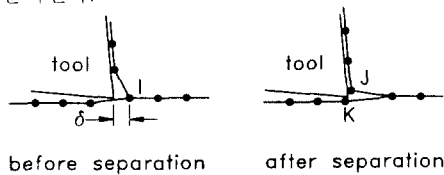


Fig. 1 Treatment of the nodes near the tool edge

공구와 피삭재 접촉면에서의 마찰은 [wata 등[2]이 제시한 아래의 조건식을 적용하였다.

$$\tau_f = (H_f / 0.07) \tanh(0.07 \mu p / H_f) \text{ [Mpa]} \quad (5)$$

절삭가공에서 공구이탈 시에 발생하는 버 형성을 시뮬레이션하기 위해서는 피삭재의 변형해석 및 온도해석과 더불어 버 형성에 수반되는 피삭재의 파단발생과 전과현상을 고려해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 연성파단기준과 요소체거기법을 도입하여 하였다[8]. 파단발생의 예측을 위해 수정된

Cockcroft-Latham 의 연성파단기준식을 이용하였다. 파단발생 이후 파단의 전과를 고려한 버 형성과정을 시뮬레이션하기 위해 연성파단기준을 만족하는 특정요소에 대해 그 요소의 강성값에 감속계수(reduction factor)를 곱하여 강성값을 매우 작게 함으로써 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하게 하였다.

3. 유한요소 모델링

2 차원 절삭가공의 해석에 이용된 피삭재의 형상과 경계조건은 Fig. 2 와 같다. 평면변형을 상태로 좌측에서 우측으로 행해지는 수평절삭을 모델링하였다. 피삭재의 길이는 1.5mm, 높이는 1.0mm 이며, 절삭폭은 단위깊이로 가정하였다. Fig. 2 의 BF 면은 피삭재의 상면이고 DF 면은 이탈단의 모서리이며, BE 면은 가공 예정면이다. 피삭재의 강제회전에 대한 영향을 줄이고 비정상상태의 절삭가공을 빠른 계산시간 내에 정상상태에 도달시키기 위해 BC 면과 CF 면상에 위치한 절점의 변위는 고정하였다. 공구 경사각 및 여유각은 각각 20°, 5° 이고 절삭깊이는 0.2mm 로 하였다. 열전달 해석에서 공구 JK 면과 피삭재 CD 면은 변형영역과 상당히 먼 곳에 위치해 있으므로 주위와의 열전달 현상은 무시하였으며, 그 외 공구와 피삭재 접촉면을 제외한 모든 자유면에서는 대류와 복사로 인한 열전달 현상을 고려하였다. 또한 공구와 피삭재의 접촉면에서는 열전도 현상과 마찰로 인한 열발생을 고려하였다.

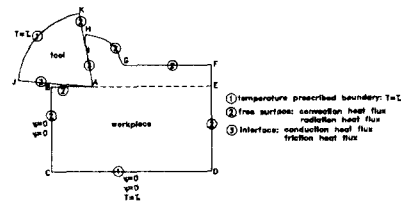


Fig. 2 Boundary conditions for non-isothermal machining

시뮬레이션에 사용된 소재는 Al6061-T6 이며, 이러한 재료의 구성방정식은 다음과 같다[4].

$$\dot{\epsilon} = A (\sinh a \bar{\sigma})^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

여기서, $A = 6.7 \times 10^{10} [1/s]$, $a = 2.9 \times 10^{-8} [1/Pa]$, $Q = 1.6 \times 10^5 [J/mole]$, $m = 6.42$, T 는 절대온도, R 은 기체상수이다. 절삭속도는 0.5[m/s]이며, 공구와 피삭재의 초기온도 및 주위분위기 온도는 20°C 로 가정하였다. 기타 열전달 해석을 위한 피삭재 및 공

구의 기계적 상태량은 Table 1 과 같다.

Table 1 Material properties of workpiece and tool

Properties	Value
Workpiece material	Al6061-T6
Tool material	HSS
Workpiece heat conduction coeff.	167 [N/s·K]
Tool heat conduction coeff.	20.9 [N/s·K]
Workpiece heat capacity	2.42 [N/mm ² ·K]
Tool heat capacity	1.64 [N/mm ² ·K]
Heat convection coeff. with air	0.09 [N/mm·s·K]
Heat transfer coeff. on interface	10 [N/mm·s·K]
Radiation	2.84×10 ⁻¹³ [N/mm·s·K ⁴]

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

0.5[m/s]의 절삭속도로 비정상상태의 절삭가공에 대한 칩 형성과정을 시뮬레이션한 결과는 Fig. 3 과 같다. 절삭가공의 초기단계에서는 비정상상태의 칩이 형성됨을 관찰할 수 있었으며, 공구 이송거리가 약 0.37mm 에 도달하였을 때 정상상태의 칩이 형성되었다. 피삭재의 변형은 주로 1 차 변형영역과 2 차 변형영역에 집중되고 있으며, 공구가 피삭재 끝면에 접근해 감에 따라 버이 형성이 거의 이루어지지 않고 절삭이 행해짐을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 4 의 유효변형률 분포로부터도 확인할 수 있다.

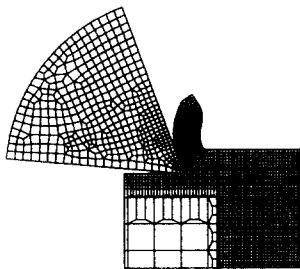


Fig. 3 Chip formation at tool path of 0.5mm

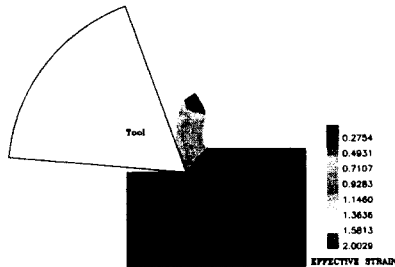


Fig. 4 Effective strain at tool path of 0.5mm

피삭재 및 공구의 온도분포를 Fig. 5 에 나타내었다. 피삭재에서 변형이 집중되는 1, 2 차 변형영역에 높은 온도가 분포하며, 특히 접촉면에서 가장 높은 온도가 존재하였다. 또한 2 차 변형영역에서 온도분포가 조밀하지 못한 것은 피삭재의 열전도도가 비교적 크기 때문이라 생각된다. 이러한 온도분포의 결과는 참고문헌[4]의 결과와 비교적 잘 일치한다. 두 결과사이에 존재하는 약간의 차이는 공구와 피삭재 접촉길이의 차이에서 기인되는 결과라 생각된다.

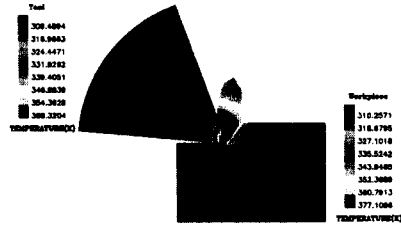


Fig. 5 Temperature at tool path of 0.5mm

Fig. 6 은 시뮬레이션으로 예측된 절삭저항의 변화를 나타낸다. 공구이송거리가 증가함에 따라 절삭저항은 점차 증가함을 볼 수 있으며, 공구이송거리가 약 0.37mm 에 도달하게 되면 절삭저항의 변화가 거의 없는 정상상태에 도달하게 된다. 정상상태에서 예측된 절삭저항은 약 70[N]으로 참고문헌[4]의 결과와 비교적 잘 일치한다. 또한 온도해석을 고려하지 않은 저속절삭에 비해 상대적으로 절삭저항이 낮은 값을 알 수 있으며, 이는 피삭재의 변형 및 공구와 피삭재의 마찰로 인한 피삭재 내부의 온도상승으로 재료가 연화되어 절삭저항이 감소하는 것으로 판단된다.

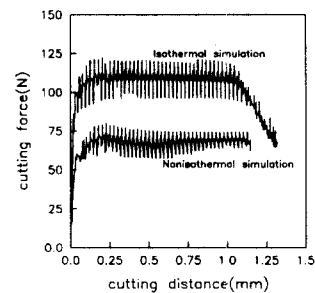


Fig. 6 Variation of cutting force

Fig. 7 은 공구이송거리가 약 1.2mm 일 때, 공구가 피삭재 끝면에 접근함에 따라 버가 형성되고 있

음을 볼 수 있다. 저속가공과는 달리 재료에 파단이 일어나지 않고 피삭재 모서리부의 소성변형으로 인하여 버가 형성되고 있음을 볼 수 있다. 버 형성의 단계에서 피삭재 내부의 유효변형률 및 온도 분포를 Fig. 8 과 9 에 나타내었다. 버의 회전중심점을 향해 피삭재 내부의 유효변형률 다소 크지고 있으며, 이 영역에서 온도상승이 일어나고 있다.

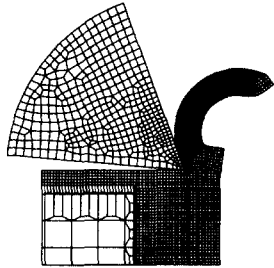


Fig. 7 Chip and burr formation at tool path of 1.2mm

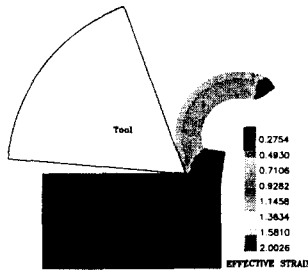


Fig. 8 Effective strain at tool path of 1.2mm

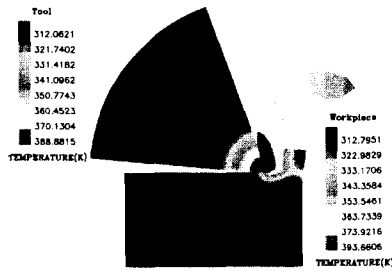


Fig. 9 Temperature at tool path of 1.2mm

이상의 결과로부터 강열점소성 유한요소법을 활용하여 개발된 전용 유한요소 프로그램은 비정상상태의 절삭가공에서 절삭속도 등과 같은 가공조건의 영향과 발생하는 온도의 영향에 대한 시뮬레이션이 가능함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 비정상상태의 2 차원 절삭가공에

서 절삭속도, 피삭재의 변형에 의한 열생성 및 공구면과 피삭재의 접촉에 의한 마찰열 등이 칩 형성과 버 형성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 강열점소성 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개발된 프로그램을 활용하여 비정상상태의 절삭가공에서 열발생 효과를 고려한 칩 형성 및 버 형성의 연속적인 시뮬레이션이 가능하였다.
- (2) 변형이 집중되는 1, 2 차 변형영역에서 높은 유효변형률과 온도가 존재하였으며, 공구와 피삭재의 접촉면에서 최대온도가 존재하였다.
- (3) 절삭가공속도의 증가는 피삭재 내부의 온도상승으로 인한 열연화 현상을 초래하므로 절삭저항이 감소함을 예측할 수 있었다.
- (4) 고속가공하에서는 피삭재의 파단발생없이 버가 형성됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-304-002-3)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Usui, E., and Shirakashi, T., "Mechanics of Machining-From Descriptive to Predictive Theory-On the Art of Cutting Metals-75 Tears Later," ASME PED, Vol. 7, pp. 13-35, 1982.
2. Iwata, K., Osakada, K., and Terasaka, Y., "Process Modeling of Orthogonal Cutting by Rigid Plastic Finite Element Method," J. Mater. Process. Tech., Vol. 106, pp. 132-138, 1984
3. Strenkowschi, J. S., and Moon, K. J., "Finite Element predictions of Chip Geometry and Tool/Workpiece Temperature Distributions in Orthogonal Metal Cutting," J. Eng. Ind., Vol. 112, pp. 313-318, 1990.
4. Wu, J. S., Dillon, O. W., and Lu, W., Y., "Thermo-Viscoplastic Modeling of Machining Process Using a Mixed Finite Element Method," J. Manfac. Sci. Eng., Vol. 118, pp. 470-482, 1996.
5. Kobayashi, S., Oh, S. I., and Altan, T., "Metal Forming and Finite Element Method," Oxford University Press, 1989.
6. Ueda, K., and Manabe, "Rigid-Plastic FEM of Three Dimensional Deformation Field in Chip Formation Process," CIRP, Vol. 42, pp.35-38, 1993.
7. 고대철, 고성림, "유한요소법에 의한 버 형성 예측 모듈의 개발," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 10 호, 2000.