

ME Z-map 모델을 이용한 NC 가공의 절삭력 예측

이한울*, 고정훈(포항공대 대학원 기계공학과), 조동우(포항공대 기계공학과)

Cutting Force Prediction in NC Machining Using a ME Z-map Model

H. U. Lee*, J. H. Ko, D. W. Cho (Mech. Eng. Dept, POSTECH)

ABSTRACT

In NC machining, the ability to automatically generate an optimal process plan is an essential step toward achieving automation, higher productivity, and better accuracy. For this ability, a system that is capable of simulating the actual machining process has to be designed. In this paper, a milling process simulation system for the general NC machining was presented. The system needs first to accurately compute the cutting configuration. ME Z-map(Moving Edge node Z-map) was developed to reduce the entry/exit angle calculation error in cutting force prediction. It was shown to drastically improve the conventional Z-map model. Experimental results applied to the pocket machining show the accuracy of the milling process simulation system.

Key Words : Cutting Force (절삭력), Milling Process Simulation (밀링 공정 시뮬레이션), NC Machining (NC 가공), ME Z-map Model (ME 지맵 모델)

1. 서론

엔드밀 가공 공정에서 자동적으로 최적의 가공 조건을 선정하는 것은 생산 자동화, 높은 생산성, 그리고 고정밀도를 구현하기 위한 가장 중요한 요소이다. 특히 금형 가공 등 제품의 구조가 복잡한 경우 가공 조건 선정의 자동화는 짧아지는 제품 수명 주기에 대처할 수 있는 가장 핵심적인 요소이다. 따라서 현재 연구의 경향은 실제 가공 현상을 정확히 시뮬레이션 하는 것에 맞추어져 있다. 가공 시뮬레이션은 정확한 절삭 해석 변수를 계산하고, 이를 바탕으로 절삭력을 예측하는 것을 목표로 하고 있다. 현재 대부분의 절삭력 모델은 단일 가공 경로에 한하여 절삭력 예측을 수행하고 있다. 그러나 실제 가공 과정은 NC 코드로부터 직선과 곡선이 결합된 다양한 경로를 통해 이루어진다. 따라서 일반적인 NC 가공에 적용할 수 있는 절삭 공정 시뮬레이션의 개발이 필요하다.

절삭 공정 시뮬레이션에 필요한 기하학적 모델링 방법에는 가공물 형상을 솔리드(solid)로 표현하는 방법과 이산적인 벡터의 집합으로 표현하는 방

법이 있다^[1]. 솔리드 모델링 방식에는 CSG^[2], Voxel^[3] 등이 있으며, 이산적인 벡터 모델링 방식으로는 Z-map 모델^[4]이 있다. 솔리드 모델링 방식은 공구의 궤적이 형성하는 부피와 가공물 사이의 불리언 연산(Boolean operation)을 통하여 절삭 공정을 시뮬레이션 한다. 수치적인 해석으로 정확한 계산을 할 수 있지만 가공물의 형상이 복잡해 질수록 데이터가 많아지고, 연산 시간이 기하급수적으로 늘어난다는 단점이 있다. 반면, Z-map 모델은 자료 구조와 구현 알고리즘이 간단하여 3 축 가공 형상을 표현하는데 널리 사용되고 있지만, 정밀도가 떨어진다는 단점이 있다. Z-map 으로 높은 정밀도를 얻기 위해서는 격자 간격을 줄여야 하지만 계산 시간의 증가와 기억 공간의 한계 때문에 쉽게 격자 간격을 줄일 수 없다.

본 논문에서는 NC 가공의 절삭 공정 시뮬레이션을 위하여 기존의 Z-map 을 개선한 ME Z-map 을 개발하여 절삭 해석 변수 계산에 사용하였다. 개발된 절삭 공정 시뮬레이션 방법을 포켓 가공에 적용하여 절삭력을 예측하였고, 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 절삭력 예측 모델

Yun 등^[5]의 모델을 이용하여 평 엔드밀에서의 j 번째 공구 회전 위치각에서의 절삭력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(j) &= \sum_k \sum_i [C_1 \cos(\phi - \alpha_r) + K_f C_3 \cos \phi \\ &\quad - K_f C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] K_n B_1 t_c(\phi) \\ F_y(j) &= \sum_k \sum_i [C_1 \sin(\phi - \alpha_r) + K_f C_3 \sin \phi \\ &\quad + K_f C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] K_n B_1 t_c(\phi) \\ F_z(j) &= \sum_k \sum_i [-C_2 + K_f C_5] K_n B_1 t_c(\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 C_1, C_2 는 일정한 값이며, C_3, C_4, C_5 는 칩 배출각, θ_c 에 의해 결정되는 값으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_1 &= \cos \theta_h / \sin \theta_{ik} \\ C_2 &= (\sin \theta_h / \sin \theta_{ik}) \cos \alpha_r \\ C_3 &= \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{ik}) \\ C_4 &= \cos \theta_c / \sin \theta_{ik} \\ C_5 &= \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{ik}) \end{aligned}$$

여기서 $\cos \theta_{ik} = \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h$ 이다.

정밀한 절삭력 예측을 위하여 공구의 힘과 런아웃을 고려한 미변형 칩두께를 사용하였다. 미변형 칩두께, $t_c(\phi)$ 는 공구 중심 좌표를 이용하여 계산할 수 있다. 절삭 중의 공구 중심 좌표는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_a(j, k) &= x_n(j) + x_p(j) + x_d(j, k) \\ y_a(j, k) &= y_n(j) + y_p(j) + y_d(j, k) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $x_n(j), y_n(j)$ 는 공구의 x, y 축 방향에 대한 공칭위치(nominal position)이며, $x_p(j), y_p(j)$ 는 런아웃에 의한 공구 중심 좌표의 변화량이다. 그리고 $x_d(j, k), y_d(j, k)$ 은 공구의 힘에 의해 변화하는 공구 중심 좌표이다.

이전 날들이 가공물의 표면에 남기고 간 자취와 현재 공구 날 위치의 상대적인 차이를 이용하여 미변형 칩 두께를 계산한다. 이전 회전에서의 공구 중심의 위치, (x_{am}, y_{am}) 을 알고 있다면 식 (4)를 이용하여 미변형 칩두께를 계산할 수 있다.

$$t_{cm}(i, j, k, m) = r - \sqrt{(x_{im} - x_a)^2 + (y_{im} - y_a)^2} \quad (3)$$

$$t_c = \text{Max}[0, \text{Min}(t_{cm}(i, j, k, m))] \quad (4)$$

미변형 칩두께가 작아지는 부근에서는 치수 효과(size effect)가 발생하여 K_n 이 커지게 된다. 치수 효과는 j 번째 공구 회전각에서 i 번째 날의 k 번째 축 방향 디스크 요소에서의 절삭 계수와 미변형 칩두께의 관계식을 통하여 고려될 수 있다. 치수 효과를 고려한 K_n 을 사용하면 매우 정밀한 절삭력 예측이 가능하다.

3. ME Z-map 모델

Z-map을 이용한 절삭 공정 시뮬레이션에서 예측 정밀도를 높이기 위해서는 격자 간격을 줄여주어야 한다. 특히 μm 단위의 절삭 깊이를 가공하는 정삭 과정을 위한 시뮬레이션을 하기 위해서는 매우 작은 격자 간격이 요구된다. 그러나 하드웨어 성능의 한계로 격자 간격을 원하는 수준으로 줄이는 일은 쉽지 않다. 본 논문에서는 절삭력 예측 정밀도를 높이고, 절삭 깊이가 매우 작은 가공에 절삭 공정 시뮬레이션을 적용하기 위하여 기존 Z-map 모델을 보완한 ME Z-map 모델을 제안하였다.

3.1 ME Z-map의 개념

기존 Z-map 모델의 가장 큰 단점은 모든 격자 점이 일정한 간격을 가지고 배치되어 있기 때문에 격자 점 사이에서의 변화는 전혀 알 수 없다는 것이다. 절삭 깊이가 격자 간격에 비하여 작고, 현재 가공하는 영역 내에 격자 점이 없다면 절삭력 예측 결과는 부정확해지며 경우에 따라서는 예측 자체가 불가능하게 된다.

본 논문에서는 이러한 Z-map의 단점을 보완하기 위하여 ME Z-map을 개발하였다. ME Z-map의 기본 개념은 그림 1과 같이 공구와 접촉하는 격자 점 가운데 가장 바깥쪽에 있는 점을 모서리 점(edge node)으로 정의하고, 모서리 점을 공구 궤적의 윤곽선상으로 이동시키는 것이다. 모서리 점은 현재 점의 위치각인 θ_m 의 방향으로 이동시키며, 이

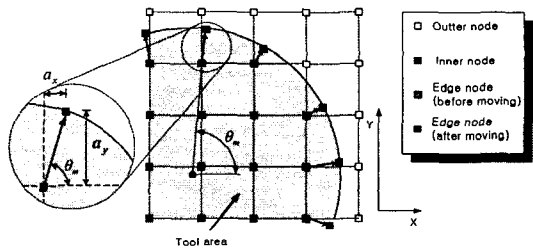


Fig. 1 Fundamental notions for ME Z-map.

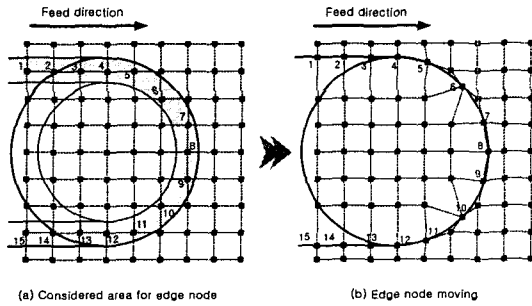


Fig. 2 The area being considered for edge nodes and the locations of the edge nodes after being moved to the edge of the swept volume in ME Z-map.

동 후 (i, j) 위치에 있는 격자 점의 좌표는 식 (5)와 같이 변경된다.

$$\begin{aligned} x &= i \cdot g + a_x \\ y &= j \cdot g + a_y \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 a_x 와 a_y 는 그림 1 에 나타난 모서리 점 좌표의 수정 값이며, 이 값은 격자 간격보다 작은 값이어야 한다.

실제 시뮬레이션에서는 격자 점을 순서대로 검색하고, 격자 점이 그림 2 (a)와 같이 공구 이동 면에서의 모서리 영역 내에 위치하면 모서리 점으로 정의한다. 그림 2 (b)는 모서리 점의 이동 후 변화된 격자 점들의 위치를 나타낸 것이며, 현재 공구 이동 면 내부에 위치할 경우 내부 점으로 재정의한다. 내부 점으로의 전환을 통해 필요 없는 부분에서 데이터 구조가 복잡해 지는 것을 없앨 수 있다. 즉 ME Z-map 에서는 그림 2 (b)와 같이 피삭재 형상을 결정짓는 부분에서만 모서리 점이 사용되고, 나머지 부분에서는 일반 격자점이 사용된다.

ME Z-map 은 일반 Z-map 에 비하여 3 배 정도의 저장 공간과 소재 제거량 계산에서는 추가적인 계산 알고리즘이 필요하다. 그러나 절삭력 예측에서는 현재 공구의 중심점과 격자점의 좌표를 이용하여 격자점의 위치각만을 사용하므로 추가적인 계산 과정이 필요하지 않다. 그리고 큰 격자 간격으로 작은 격자 간격을 갖는 일반 Z-map 보다 높은 정밀도를 얻을 수 있으며, 시뮬레이션 시간 간격을 매우 작은 범위까지 원하는 값으로 선택할 수 있다.

3.2 Z-map 과 ME Z-map 의 비교

실제 절삭 공정 시뮬레이션에 적용하였을 때 ME Z-map 의 성능을 평가해 보기 위하여 그림 3 과 같은 절삭 공정을 시뮬레이션 하였다. 그림 3 은 코너, 직선과 원호가 만나는 부분, 그리고 원호 가공

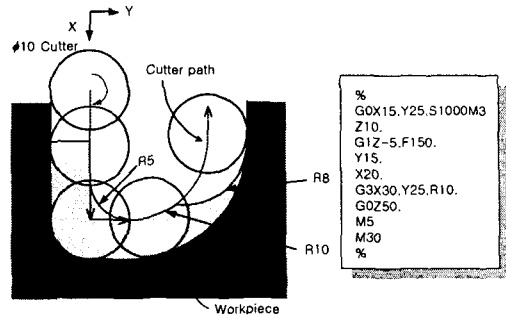
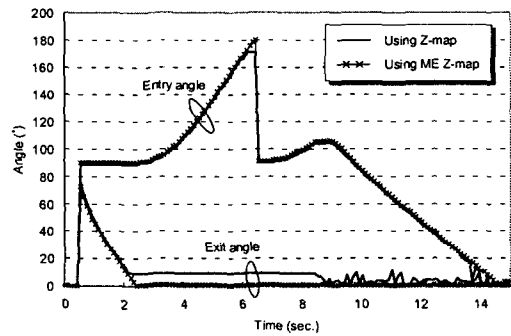
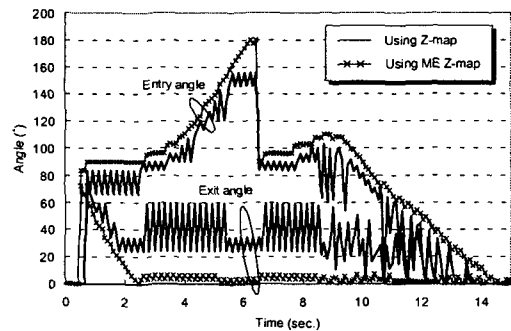


Fig. 3 Example of transient cut in 2D end milling process for comparison between Z-map and ME Z-map.



(a) 0.1 mm grid size.



(b) 0.5 mm grid size.

Fig. 4 Comparison of entry and exit angle calculated using Z-map and ME Z-map in the case of Fig. 3.

중 반경 방향 절삭 깊이, d_w 가 줄어드는 부분이 복합되어 있는 절삭 구간이다. 일반 Z-map 과 ME Z-map 을 이용하여 절입각과 배출각을 예측한 결과는 그림 4 의 (a),(b)와 같다. Z-map 은 격자 간격이 커지면 정확한 값을 예측할 수 없었으나 ME Z-map 은 격자 간격에 관계없이 정확한 값을 예측하고 있으며 더 큰 격자 간격으로도 Z-map 보다 정확한 결과를 보이고 있다.

ME Z-map 은 Z-map 보다 5~10 배 정도 큰 격자

간격을 사용하고도 더욱 정확한 각도 예측이 가능하다. 따라서 절삭력 계산을 위한 절삭 공정 시뮬레이션에서는 정밀한 각도 예측이 가능한 ME Z-map 을 이용하면, 빠른 계산 시간과 정밀한 예측을 동시에 이룰 수 있다.

4. NC 가공의 절삭력 예측

ME Z-map 을 이용하여 일반적인 NC 가공의 절삭 공정 시뮬레이션을 통하여 절삭력을 계산하고, 이를 실험 결과와 비교하였다.

포켓 가공의 대상은 그림 5 와 같은 형상이며, 공구 경로는 CNC Software 사의 Mastercam 을 이용하여 생성하였다. 공구 경로의 오프셋(offset)은 3mm 로 설정하였고, 이송 속도와 주축 회전 속도는 150mm/min 과 1000rpm 으로 전체 공구 경로에서 동일하다. 공구는 직경 10mm 인 평 엔드밀을 사용하였다. 절삭력 측정 실험은 대우중공업의 ACE-V30 에서 수행하였고, 사용된 공구는 고속도강 평 엔드밀, 피삭재의 재질은 AI 2024-T6 이다.

절삭력 모델과 ME Z-map 을 이용한 절삭 공정 시뮬레이션을 이용하여 그림 5 의 공구 경로 가운

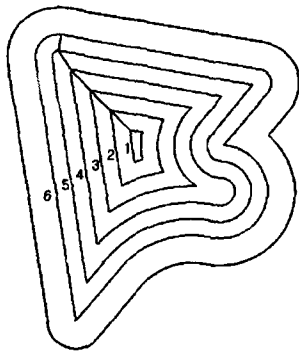


Fig. 5 Tool path for pocket machining.

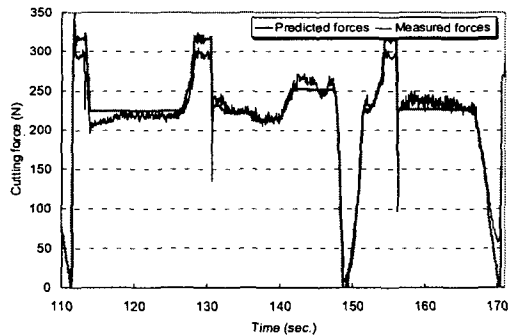


Fig. 6 Comparison between measured and predicted maximum cutting force for loop 5.

데 5 번째 경로에서의 절삭력을 예측하여 보았고, 실험값과 비교한 결과는 그림 6 과 같다. ME Z-map 을 이용하여 절삭 해석 변수를 정확히 계산함으로써 정밀한 절삭력 예측이 가능하였다.

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 NC 가공의 절삭력을 예측하기 위하여 절삭 공정 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 절삭력을 예측하기 위해서는 절입각과 배출각의 계산이 매우 중요하므로, 일반 Z-map 의 단점을 보완한 ME Z-map 을 개발하였다. 개발된 ME Z-map 은 격자 간격이 크거나 시뮬레이션 시간 간격이 짧은 경우에도 정밀하게 각도를 계산할 수 있었다.

개발된 절삭 공정 시뮬레이션 시스템을 임의의 포켓가공에 적용하여 절삭 해석 변수를 계산하고, 절삭력을 예측한 결과 개발된 방법이 효과적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 ㈜터보테크 주관의 2001 년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 최병규, 정연찬, “ Z-map 을 사용한 모의가공과 NC code 의 검증 ”, IE interface, Vol. 8, No. 3, pp. 155-169, 1995.
2. W. P. Wang, K. K. Wang, “Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids,” IEEE CG&A, Vol. 6, No. 12, pp. 8-17, 1986.
3. D. J. Jang, K. S. Kim, J. M. Jung, “Voexl-based Virtual Multi-axis Maxhining,” Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 10, pp. 709-713, 2000.
4. R. B. Jerard, R. L. Drysdale, K. Hauck, B. Schaudt, J. Magewick, “Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surface,” IEEE CG&A, pp. 26-39, 1989.
5. W. S. Yun, D. W. Cho, “An Improved Method for the Determination of 3D Cutting Force Coefficients and Runout Parameters in End Milling,” Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 116, No. 12, pp. 851-858, 2000.