한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집 pp.206~210

볼 앤드밀 가공에서의 공구 처짐 보정을 위한 시뮬레이션 시스템 개발
A Development of a Simulation System for Compensating Tool Deflections of a Ball-end Milling

박홍석*(울산대학교), 유재학(울산대학교 기계공학대학원), 이재종(한국 기계 연구원)

Abstract

금형 및 자동차 산업에 널리 사용되는 앤드밀 가공에서 종종 소비자가 요구하는 가공 정밀도를 충족시켜 주지 못하는 경우가 발생한다. 이것은 열변형, 공구 마모, 공작 기계 자체의 오차, 공구 처짐 등 다양한 원인이 존재한다. 본 연구에서는 공구 처짐으로 발생되는 가공 오차를 줄임으로써 가공 정밀도를 향상하기 위한 시스템을 개발하고자 한다.

이를 위해 3차원 볼 앤드밀의 절삭력 모델을 개발하고 시뮬레이션한다. 또한, 상용 CAD 시스템의 형상 및 가공 정보를 이용함으로써 모델링에서부터 가공 경로 생성, 그리고 경로 보정이라는 과정을 일괄적으로 수행할 수 있도록 한다. 이를 통해 사용자는 가공 전 시뮬레이션을 통해 가공 오차를 줄일 수 있는 기회를 제공 받는다. 따라서, 실제 가공에서 보다 높은 가공 정밀도를 얻을 수 있을 것이다.

1. 서론

절삭 가공 중 앤드 밀링은 금형 및 자동차 산업의 발달과 더불어 기계 가공 분야에서 널리 적용되고 있다. 그러나, 앤드밀 가공에서 가공 정밀도가 종종 소비자의 요구를 충족시키지 못한다는 것이며, 결과적으로 가공 정밀도를 만족시키기 위해 재가공을 하게 된다. 이로 인해, 시간과 비용적으로 많은 손실을 초래한다. 가공 정밀도를 저하시키는 가공 오차의 원인으로서는 열변형, 공구 마모와 절삭력 증가에 의한 표면 손상, 공구 처짐 등 다양한 원인이 있지만, 본 연구에서는 공구 처짐에 의해 발생하는 가공 오차에 중점을 두고자 한다.

최근 들어, 공구 처짐에 의한 가공 오차를 줄이기 위한 많은 노력이 있었다. 1997년, Schwab[1]는 GRIP을 이용하여 토러스밀(Torus Mill)의 공구 처짐을 계산하여 공구 경로를 보정하는 시스템을 개발하였다. 그러나, 절삭력 모델로써 Kronenberg에 의해 개발된 단순한 모델을 적용하여, 정확한 절삭력을 계산하는 데에는 한계를 가지고 있다. 시뮬레이션으로 공구 처짐을 예측하는 방법 외에 실시간으로 공구 처짐을 보정하기 위한 시스템에 대한 연구가 진행되었다. Yang[2]은 공작기계의 툴 어뎁터에 절삭력 센서를 내장하여 실시간으로 공구 처짐을 보정하도록 하였다.

앤드 밀링에 있어서 가공 중 앤드밀의 처짐은 가공 오차 발생의 주원인으로 작용하여 고정도 가공에 직접적인 제약이 되고 있다. 공구 처짐은 가공 중 공구에 작용하는 절삭력과 외팔보 형태의 공구 형상에 따른 강성 부족에 의해 발생한다. 본 연구에서는 앤드밀 가공에서의 절삭력을 계산하고, 이를 통해 공구 처짐량을 계산하고 공구 경로를 수정하는 시뮬레이션 시스템을 구축한다. 이를 위해 절삭력 모델을 개발하고 상용 CAD 시스템에 모듈화가 가능한 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 이것은 CAD에서 모델링된 제품 모델의 정보와 CAM에서 생성된 가공 정보를 이용할 수 있는 장점이 있다. 다시 말해, 제품 모델링에서부터 NC 코드 생성, 그리고 이를 보정하는 시뮬레이션이 일괄적으로 수행될 수 있음을 의미한다. 적용된 상용 CAD 시스템은 Uni-Graphics Ver. 16이다.

2. 절삭력 모델

정확한 공구 처짐을 예측하기 위해서는 우선적으로 정밀한 절삭력 모델이 요구된다. 지금까지 밀링에 대한 많은 절삭력 모델이 연구되었으나, 대부분이 평앤드 밀링에 집중되어 있다. 볼 앤드 밀링

에 대한 연구로서는 Yang과 Park[3], Abrari와 Elbestawi[4], Feng과 Menq[5,6] 그리고 Yucesan과 Altinta[7] 등이 있다. Yang과 Park은 실험을 통한 경험적인 절삭력 계수를 적용하여 절삭력을 예측하고자 하였다. Abrari와 Elbestawi는 공구와 가공물의 기하학적 형상을 이용하여 절삭 단면적을 예측하고 이로부터 절삭력을 계산하였다.

본 연구를 위해서 두 가지 방법이 순차적으로 적용되었다. 첫째는 공구와 가공물의 기하학적 형상을 이용한 절삭 단면적을 계산하고 이를 통해 절삭력을 예측하는 방법이다. 우선적으로 이 방법을 통해 절삭력을 계산하고 차후 소개될 두 번째 방법과 비교하였다. 여기에 적용된 절삭력 모델은 Imani, Sadeghi와 Elbestwi에 의해 소개된 모델을 향상 시킨 것으로, 절삭 단면적 계산에 있어 기존의 절삭 단면적 계산식을 향상시켰으며, 3차원의 절삭력을 제공한다.

절삭 단면적은 절삭력에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 절삭 단면적을 계산하기 위해 칩 두께를 우선적으로 계산하여야 하는데, Martelloti[8]는 다음과 같이 칩 두께를 계산하는 식을 제안하였다.

$$t_c(\theta) = R + F_t \sin g\theta - (R^2 - F^{2\prime} \cos^2\theta)^{\frac{1}{2}} \quad \cdots 식(1)$$

R : Tool Radius

F_t : Feed per tooth

θ : Edge angle

식(1)은 다음과 같이 간략하게 표현될 수 있으며, 간단한 칩두께 계산에 있어 널리 사용되고 있다.

$$t_c(\theta) \approx F_t \sin\theta \quad \cdots\cdots 식(2)$$

그러나, 위의 식들은 정확한 칩 두께를 계산하기에는 충분하지 않다. 따라서, Imani, Sadeghi와 Elbestwi[9]는 더욱 정밀한 칩 두께를 계산하기 위해 다음과 같은 식을 소개하였다.

$$t_c(\theta, z) = R_2(z) + F_h \sin\theta - [R_1^2 - F_h^2 \cos^2(\theta)]^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots 식(3)$$

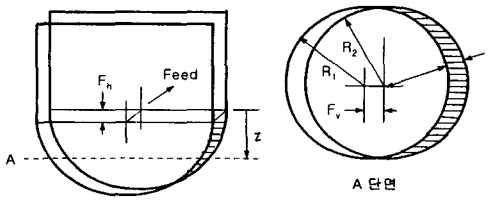

그림 1 : 절삭 단면적

계산된 칩 두께로부터 다음과 같이 미소 절삭 단면적을 계산할 수 있다.

$$dA_r(\theta, z) = 2t_c(\theta, z)\frac{dz}{\cos(i(z))} \quad \cdots\cdots 식(4)$$

여기에서 $i(z)$ 는 헬릭스 각이며 다음과 같다.

$$i(z) = \arctan\left(\frac{R(z)\tan(\phi_0)}{R}\right) \quad \cdots\cdots 식(5)$$

R(z) : Slice radius

ϕ_0 : Helix angle at the starting point

식(4)로부터 미소 절삭력은 다음과 같이 유도된다. 여기에서 F_{nr}은 법선 방향의 힘이며, F_{fr}은 마찰력 방향의 힘이다.

$$|d\vec{F}_{nr}(\theta, z)| = K_{nr}(z)\, dA_r(\theta, z) \quad \cdots\cdots 식(6)$$

$$|d\vec{F}_{fr}(\theta, z)| = K_{fr}(z)\, dA_r(\theta, z) \quad \cdots\cdots 식(7)$$

K_{nr}과 K_{fr}은 절삭 계수이다. 식(6)과 식(7)의 미소 절삭력은 볼 앤드밀의 최하단(z_{in})에서 가공물을 절삭하는 높이(z_{out})까지 적분하여 절삭 단면적을 계산할 수 있다.

$$\vec{F}(\theta) = \int_{z_{out}}^{z_e} [K_{nr}(z)\ \hat{n}_{nr}(\theta, z) + K_{fr}(z)\ \hat{n}_{fr}(\theta, z)]\, ds($$

$\cdots\cdots$ 식(8)

$\hat{n}_{nr}$: F_{nr}의 단위 법선 벡터

$\hat{n}_{fr}$: F_{fr}의 단위 법선 벡터

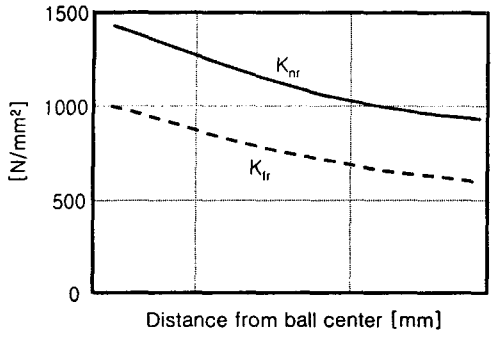

그림 2 : 절삭 계수(Cutting coefficient)

3. 시스템 구축

2 장에서 공구와 가공물의 기하학적 형상으로부터 절삭 단면적과 절삭력을 계산하는 방법을 소개하였다. 그러나, 실제 시스템 구축에 있어서는 더욱 간단하고 유용한 방법이 적용된다.

UG(Uni-Graphics)에서 모델링된 제품 모델의 정보와 CAM에서 생성된 가공 정보를 이용하기 위하여 UG에서 지원하는 다양한 UFunction를 이용한다. 여기에는 공구와 가공물이 교차되는 부분으로부터 단면적을 계산하는 함수가 있으며, 이를 이용하여 간단하고 빠르게 절삭 단면적을 계산할 수 있다. 이 함수를 통해 얻어진 절삭 단면적을 식 (6), (7) 그리고 (8)에 대입하여 절삭력을 계산한다.

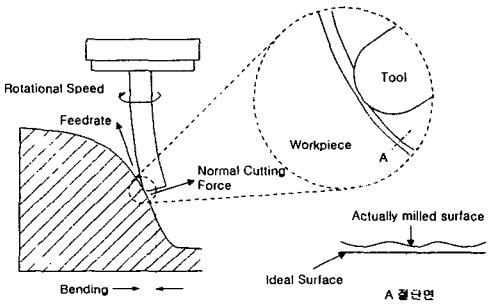

그림 3 : 공구 처짐의 정의

공구 처짐량은 공구 홀더에 고정된 공구가 절삭력에 의해 처지는 양이다.(그림 3) 이 때, 공구 홀더에 고정된 공구는 외팔보의 형태로 가정한다. 초기의 생성된 공구 경로를 계산된 공구 처짐량만큼 보정하여 새로운 공구 경로를 생성한다. 보정 시스템의 전체적인 알고리즘은 아래 그림 4와 같다.

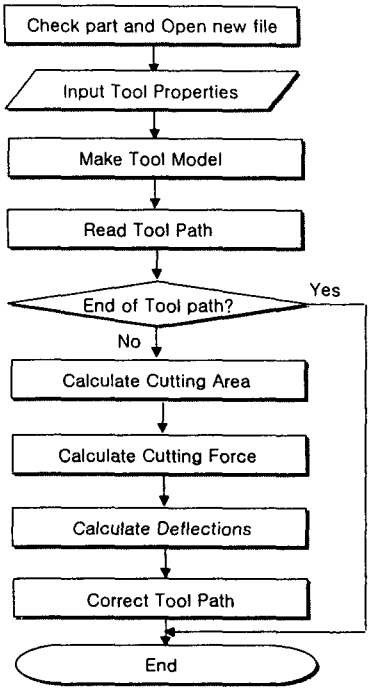

그림 4 : 보정 시스템의 전체 알고리즘

공구 특성이 입력되면 UF_modl 함수를 사용하여 공구 모델을 생성한다. 그리고, UF_udop, UF_oper 함수를 사용하여 가공 정보 중 공구 경로를 읽어온다. 공구 모델을 공구 경로에 따라 이동시키며 가공 시뮬레이션이 이루어진다. 이 때 공구와 가공물의 교차 부분의 형상을 UF_modl_ask 함수를 사용하여 절삭 단면적을 구한다.[10] 구해진 절삭 단면적으로부터 절삭력과 공구 처짐량이 계산된다. 읽어들인 공구 경로를 공구 처짐량 만큼 보정하여 공구 경로를 수정한다. 이러한 과정은 공구 경로의 수만큼 반복된다. 공구 경로 정보는 볼 앤드밀의 끝점의 x, y, z 좌표로 나타난다.

공구 모델은 7개의 파라메터로 구성되어 있다. 이것은 볼 앤드밀의 형상을 적절히 표현하기 위한 최소의 수이다. Diameter(D)은 밀링 공구의 직경이며, Lower Radius(R1)은 볼의 반경이다. 평 앤드밀의 경우 R1은 0이 되며, 볼 앤드밀의 경우 D의 1/2이다. Length(L)은 공구의 길이이며, Taper Angle(B)은 공구 옆면의 기울어진 각을 나타낸다.

Flute Length(FL)은 공구 홀더에 물린 공구의 길이를 제외한 길이를 말하며, 공구 처짐량을 계산할 때 외팔보의 길이가 된다.[11] 그 외 상세한 공구 형상을 정의하기 위한 몇몇의 파라메터가 있다. 공구 형상은 미리 사용자가 입력할 수 있으며, 미리 정의된 공구 형상을 호출할 수도 있다.

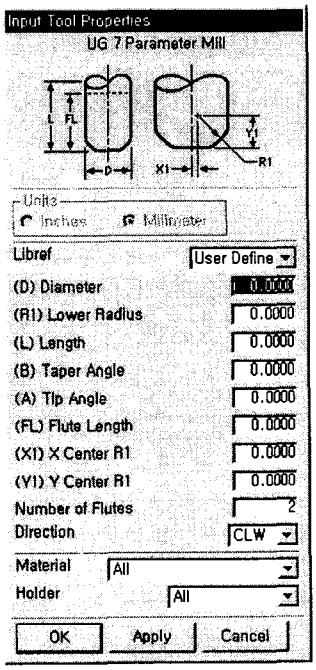

그림 5 : 공구 형상 파라메터

4. 시뮬레이션

구축된 시스템을 사용하여 가공 시뮬레이션을 하였다. 공구는 1 inch 볼 앤드밀, N은 450 rpm 그리고 이송 속도는 0.1 mm/teeth로 하였다. 공구

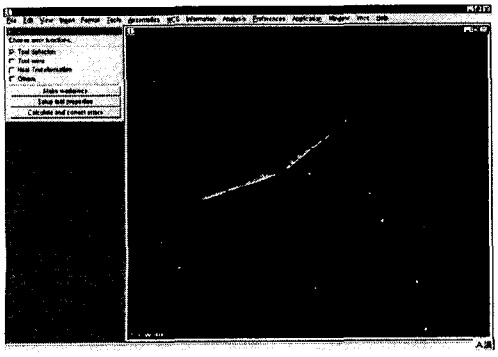

그림 6 : 보정 시스템의 시뮬레이션 과정

경로는 선형 경로를 생성하여 사용하였다. 처음에는 공구와 가공물의 기하학적인 형상을 이용한 절삭력 모델을 사용하여 시뮬레이션을 하고, UFunction을 이용한 절삭력 계산과 비교하였다. 두 방법의 결과는 거의 동일하게 나타났으며, UFunction을 이용한 시뮬레이션 과정은 그림 6과 같다.

공구 경로는 금형 제작에 있어서 정삭 과정에 해당하는 경로만을 시뮬레이션 하였으며, 가공물은 곡면이 없는 육면체를 사용하였다. 그 결과, 절삭력은 그림 7과 같이 나타났다.

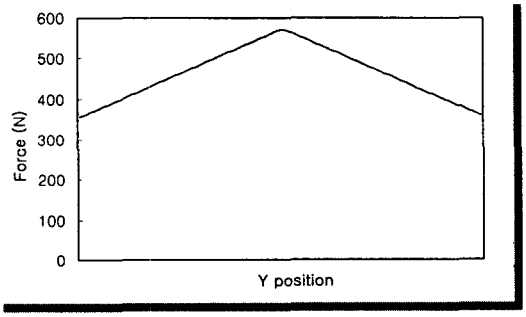

그림 7 : 절삭력 시뮬레이션 결과

5. 결론

공구 처짐 보정 시스템을 비교적 단순한 형태의 시뮬레이션을 통해 검증해 보았다. 현재 초기의 공구 경로와 보정된 공구 경로를 이용하여 실제 가공을 통한 검증이 이루어지지 않은 단계이다. 본 연구를 통해 CAM 시스템을 사용하여 생성된 공구 경로를 시뮬레이션하고 이를 보정하는 모듈을 개발하였다는데 의의를 두고자 한다. 이러한 보정 시스템은 사용자에게 가공 전 시뮬레이션을 통해 가공 오차를 줄일 수 있는 기회를 제공함으로써 실제 가공에서 보다 높은 가공 정밀도를 얻을 수 있도록 한다.

차후, 가공 실험을 통해 본 시스템을 검증하는 단계를 거쳐야 할 것이다. 또한, 공구 처짐 외에 열변형 및 공구 마모에 의한 가공 오차를 보정하기 위한 모듈을 포함할 예정이다.

후 기

본 연구는 부분적으로 울산대학교 지역 공동 연구 센터(RRC)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Schwab, J. "Kompensation der Fräserabdrängung beim Schlichten von Hohlformen", Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2 : Fertigungstechnik, Nr. 441, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1997

[2] 양민양, 최종근, "정밀 앤드밀링을 위한 실시간 공구 처짐 보정 시스템", 대한 기계학회 논문집(A), 제 21권 제 2호, pp. 189-198, 1997

[3] M. Yang, H. Park, "The prediction of cutting forces in ball-end milling", Int. J. of Machine Tool Design and Manufacture 31(1), pp 45-54, 1991

[4] F. Abrari, M. A. Elbestawi, "Closed form formulation of cutting forces for ball and flat end mills", Int. J. of Machine Tool Design and Manufacture 37(1), pp 17-27, 1996

[5] H. Feng, C. Menq, "The prediction of cutting forces in ball-end milling process - Part I : Model formulation and model building procedure", Int. J. of Machine Tool Design and Manufacture 34(5), pp 697-710, 1994

[6] H. Feng, C. Menq, "A flexible ball-end milling system model for cutting force and machining error prediction", ASME J. of Manufacturing Science and Engineering 118, pp 461-469, 1996

[7] G. Yucesan, Y, Altintas, "Prediction of ball end milling forces", ASME J. of Engineering for Industry 118, pp 95-103, 1996

[8] M. E. Martellotti, "An analysis of the milling process", Transaction of the ASME 67, pp 677-700, 1941

[9] B. M. Imani, M. H. Sadeghi, M. A. Elbestawi, "An improved precess simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces", Int. J. of Machine Tool Design and Manufacture 38, pp 1089-1107, 1998

[9] UG Manual, "UG/Open API Reference", Ver 15.0

[11] UG Manual, "Manufacturing", Ver 15.0