

상용 Solid Modeler 를 이용한 볼 엔드밀 가공의 절삭력 예측

이재종*(한국기계연구원), 박찬훈(한국기계연구원), 최종근(순천대학교)

Prediction of Cutting Force in Ball-end mill Cutting using the Commercial Solid Modeler

J. J. Lee (KIMM), C. H. Park (KIMM), J.G. Choi (Univ. of Suncheon), H.S. Park (Univ. of Ulsan)

ABSTRACT

Many researches on the prediction of cutting forces of ball-end mills have been achieved since before several decades ago. These kinds of researches have been concentrated on the study on how to make the prediction equations for the cutting forces based on 2-D cutting experimentation. The results of them were really good and impressive. But it's not proper to practical uses for industrial fields, because if sculptured surface were to be machined, then it would be very difficult to understand the complicated kinematical interaction between the sculptured surface and the flutes of a ball-end mill. So, we propose the method for solving these kind of problems using existed commercial CAD/CAM software; Unigraphics. Furthermore, the modification of tool path which is done off line is offered to increase the precision of cutting.

Key Words : Machining Accuracy(가공정도), Mold and Die(금형), Cutting force (절삭력), Tool Deflection(공구처짐), Solid Modeler(솔리드모델러), Ball-end mill(볼엔드밀)

1. 서론

볼엔드밀의 절삭력 예측에 관련한 연구는 최근 많은 연구 그룹들에 의해서 상당한 진전을 보고 있다. 이러한 연구는 주로 2 차원 절삭의 결과를 볼엔드밀에 적용하기 위한 결과들이 주류를 이루고 있다. 즉, 2 차원의 선반 절삭에서 얻어지는 절삭 관련 파라미터들과 절삭력과의 관계를 구하고 이를 이용해서 3 차원의 볼 엔드밀 절삭에 적합하도록 기하학적 상관관계를 고려한 절삭력 예측모델을 만드는 것이다. 이러한 연구 결과는 이미 합리적인 실험적 성공을 거두고 있다. 그러나 이는 단순한 형상의 가공물의 경우에 해당한다. 즉, 가공물의 형상이 복잡해지면 공구와 가공물의 기하학적 접촉에 대한 정보가 복잡해 지기 때문에 이론적인 해석이 매우 어렵게 된다. 이는 이러한 절삭력 예측 기술의 실용화를 어렵게 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 기하학적 해석을 상용의 Solid Modeler 를 이용해서 용이하게 할 수 있도록 함으로써 기존의 절삭력 모델에 관련한 연구가 실용성을 가질 수 있도록 하였다. 더 나아가서 예측된 절삭력을 바탕으로 공구의 궤적을 Off-line 으로 수정함으로써 가공 정도의 향상을 얻을 수 있었다.

2. 일반적인 절삭력의 예측 방법

볼 엔드밀로 3 차원 가공을 수행할 때 Feed 는 수직과 수평의 2 가지 방향으로 발생하게 되는데 공구날의 위치에 따라서 미변형칩의 두께(t_c)는 달

라지게 된다. Fig. 1 에서 F_h, F_v 는 각각 수평 및 수직 Feed 를 의미한다.

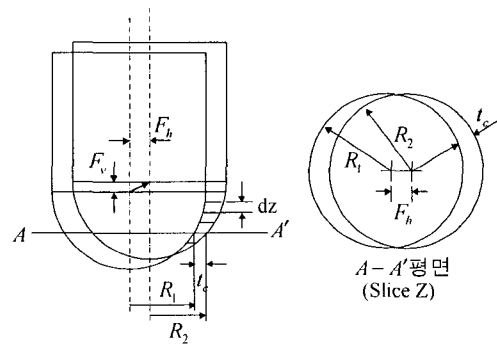


Fig. 1 Radial chip thickness and feed for 3-axis tool path

가공시에 공구에 작용하는 절삭력을 계산하기 위해서는 미소 높이(dz)의 공구단면을 고려하는 것이 편리하다. Fig. 1 에서 오른쪽 그림은 $A-A'$ 평면을 기준으로 두께가 dz 가 되도록 얇게 잘려진 공구의 단면이다. 이 단면에서 미변형칩의 두께(t_c)는 Eq. 1 로 표현될 수 있다[1]. 이때 중요한 것은 Eq. 1 은 절삭에 참여하는 공구 부분에 대해서만 계산되면 된다는 점이다. 즉, 미변형칩의 두께는 가공물의 형상에 상관없이 Eq. 1 에 의해서 계산될 수 있으며, 선택된 공구 단면이 가공에 참여하는 경우에만 의미가 있다. 따라서 임의의 공구단면이 절삭에 참여하는지 혹은 그렇지 않은지를 반드시 판단

하여야 한다. 그러나 가공물의 형상이 단순하지 않을 때는 이것은 대단히 어려운 일이 된다.

$$t_c(\theta, z) = R_2(z) + F_h \sin\theta - \sqrt{[R_2^l(z) - F_h^2 \cos^2(\theta)]} \quad (1)$$

미소 두께 dz 의 선택된 공구단면에 작용하는 절삭력을 계산하는 것은 Eq. 2 에서 주어지는 방법으로 가능하다. $dA_r(\theta, z), ds(z)$ 는 각각 미소 칩 접촉 면적과 미소 절삭날 길이를 의미한다. 미소 칩 접촉 면적은 미변형 칩 두께의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} d\bar{F}_{nr}(\theta, z) &= K_{nr}(z)dA_r(\theta, z) \\ d\bar{F}_{fr}(\theta, z) &= K_{fr}(z)dA_r(\theta, z) \\ d\bar{F}_{ne}(\theta, z) &= K_{ne}(z)ds(z) \\ d\bar{F}_{fe}(\theta, z) &= K_{fe}(z)ds(z) \end{aligned} \quad (2)$$

$d\bar{F}_{nr}, d\bar{F}_{fr}, d\bar{F}_{ne}, d\bar{F}_{fe}$ 는 각각 Rake Face 상에 작용하는 힘과 절삭날 상에 작용하는 힘을 의미한다. 이 힘들에 대응하는 각각의 절삭 계수들 ($K_{nr}, K_{fr}, K_{ne}, K_{fe}$) 은 실험을 통해서 구해질 수 있다[1]. 이제 Eq. 3 과 같이 Eq. 2 의 미소 힘들을 각각의 선택된 공구단면에 대해서 적분함으로써 공구 전체에 걸리는 힘의 합력을 계산할 수 있다.

$$F(\theta) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} [K_{nr}(z)\bar{n}_r(\theta, z) + K_{fr}(z)\bar{n}_f(\eta_c, \theta, z)]dA_r(\theta, z) + [K_{ne}(z)\bar{n}_e(\theta, z) + K_{fe}(z)\bar{n}_f(\theta)]ds(z) \quad (3)$$

절삭력의 계산을 위해서 본 논문에서는 논문[1]에서 제안된 방법 (Eq. 1 - Eq. 3)을 사용했지만 절삭력의 예측 방법은 많은 논문들([2]-[6])에서 상당히 다양하게 제시되고 있다. 그러나 대부분의 논문들에서 제시하는 방법론에서 적분구간의 선택이 실질적인 어려움이 되고 있다.

3. 절삭 과정의 모델링

본 논문에서 제안하는 내용을 요약한다면 “절삭력 예측을 복잡한 가공물에 대해서도 가능하게 하는 것”이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 공구와 공구 날 그리고 가공물의 기하학적인 관계를 찾아내야 한다. 이것을 간단히 요약하면 아래의 3 단계가 된다.

1. Boolean 작업을 통해서 공작물의 절삭을 표현한다.
2. 공구의 날과 공작물의 접촉 정보를 찾는다.
3. 이것을 기반으로 식 3 을 통해 절삭력을 계산한다.

Boolean Operation 을 통한 공작물의 절삭을 표현하는 것은 아래의 그림 2 에서 설명될 수 있으므로 자세한 설명은 생략한다.

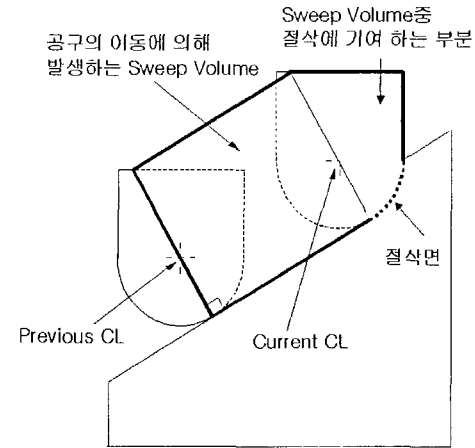


Fig. 2 Boolean Operation to express the cutting process

Fig. 2 에서와 같이 절삭면이 결정되었으므로 이 절삭면과 공구의 접촉상태를 구할 수 있다. 이것은 절삭면의 외곽 Edge 들과 공구의 Flute 의 Intersection Point 들을 얻는 것으로 결정될 수 있다. Fig. 3 에서 좌측에는 공구의 형상이 Solid 로 보이고 있는데 공구의 볼파트위에 삼각형으로 빗금이 쳐진 부분이 절삭면과 접촉하는 부분이다. 그림의 오른쪽 쪽은 공구의 형상을 실루엣만 보여주고 있다. 그림에서 절삭날이 2 개 보이고 절삭면과 접촉하는 부분이 보인다. 이 접촉면과 절삭날의 교점으로부터 절삭에 참여하는 공구날의 상한과 하한을 결정할 수 있는데 이 정보(적분구간)는 공구의 360 회전 동안 계속해서 변하게 된다. 이 적분구간에 대한 간단한 예가 그림 4 에 나타나 있다.

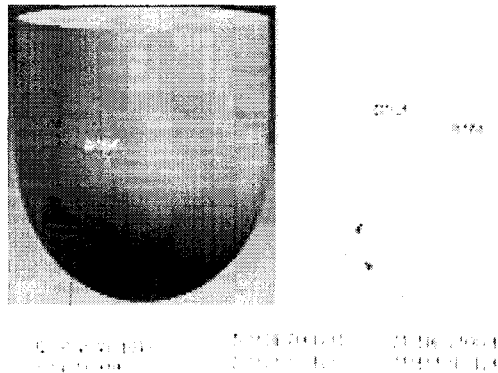


Fig. 3 Upper limit and lower limit of the flute engaged in cutting process

그림 4 는 직사각형의 블라클을 볼 엔드밀이 절삭해 나갈때의 간단한 예이다. 물론 복잡한 형상을

절삭하는 경우에는 훨씬 복잡한 형상을 보일 것이다. 그림 4 는 이렇게 결정된 적분구간을 이용해서 적분식 3 을 계산하는 방법을 보여주고 있다.

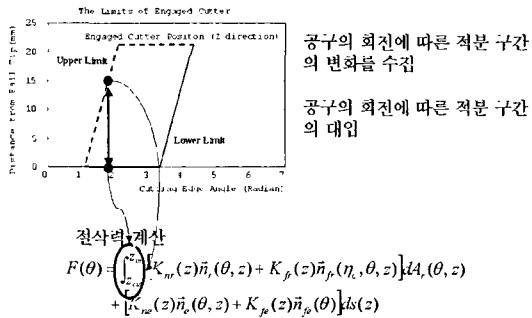


Fig. 4 Calculation of Eq 3 with upper and lower limit of the flute engaged in cutting process

4. 공구 변형의 예측과 경로의 보상

3 장에서는 절삭력의 예측에 관해 기술하였다. 본 장에서는 이렇게 예측된 절삭력을 바탕으로 공구의 변형을 예측하고 경로를 Off-line 으로 보상하는 방법에 관하여 설명하고자 한다. 우선 공구의 변형을 예측하기 위해서는 공구의 강성에 관한 모델이 개발되어야 한다. 이 강성은 머시닝 센터와 공구가 결합된 강성이며, 본 논문에서는 그림 5 와 같은 단순한 모델을 고려하였다.

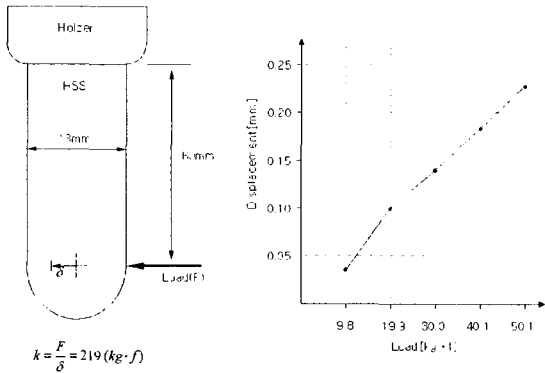


Fig. 5 Stiffness of ball end mill

공구의 변형 중에서 표면의 정도에 영향을 미치는 것은 가공물 표면의 수직방향으로 발생하는 변형 성분이다. 즉 가공물의 Surface Normal 방향으로 발생하는 공구의 변형량이 예측 가능하므로 이와 반대 방향으로 공구의 궤적을 미리 수정하면 공구 변형에 의한 가공물의 정도 저하를 막을 수 있다. 계획된 공구의 위치 (Original CL), 변형된 공구의 위치 (Deflected CL), 보상된 공구의 위치 (Compensated CL)가 그림 6 에 잘 나타나 있다.

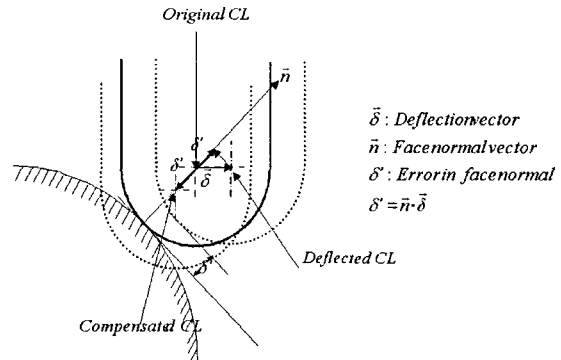


Fig. 6 Deflection and compensation of ball end mill

5. 구현 및 실험

본 연구에서는 단순한 형상이 아닌 경우에도 절삭력의 예측하고, 이를 바탕으로 공구 경로를 보정하고, 이렇게 보정된 공구경로를 이용해서 더 나은 가공 정도를 얻고자 한다. 이 과정에서 가공물을 설계하고, 공구경로를 생성하고, NC code 를 생성하는 기본적인 CAM 의 기능은 Unigraphics 를 사용해서 구현이 된다. 그림 7 을 보면 상용툴의 역할과, 본 연구에서 개발된 프로그램의 역할이 잘 구별되고 있다. Unigraphics 는 사용자가 원하는 기능을 스스로 프로그램해서 window 의 DLL 형태로 개발하면 이것을 Unigraphics 자신에 Import 해서 수행하는 기능을 가지고 있다. 따라서 그림 7 의 우측에 보이는 내용은 DLL 의 형태로 완성이 되었으며 2-4 장의 내용을 구현하고 있다.

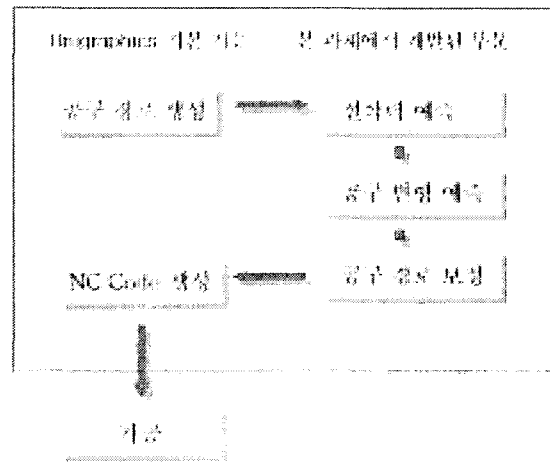


Fig. 7 The structure of proposed scheme

실험을 통해서 본 논문에서 제안한 방법이 매우 효과적임을 알 수 있었다. 그림 9 은 원호 형상의 일부를 볼 엔드밀로 가공한 실험의 결과이다. 가공

물의 형상은 그림 8 에 잘 나타나있다. 가공 깊이는 약 2mm, Feed 는 68mm/min, Flute 은 2 개, 공구의 길이는 60mm, 공구의 직경은 13mm, 공구의 재질은 HSS, 가공물의 재질은 SDK 이다. 그림 8 은 공구의 변형과 보상량을 계산하고 있는, 개발된 프로그램의 화면의 Screen shot 이다. 그림 8 에 보이는 공구 변형량은 약 500 배 확대된 것이다. 그림 9 는 공구의 경로를 보상하지 않은 NC Code, 즉 Unigraphics 만으로 생성한 NC Code 로 가공한 경우와 보상된 공구 경로 파일로부터 NC Code 를 생성해서 이것으로 실제 가공한 결과를 비교해서 보여주고 있다. 보상전에는 최대 약 300um 까지 형상 에러가 있었지만 보상 후에는 약 100um 의 에러가 발생했다.

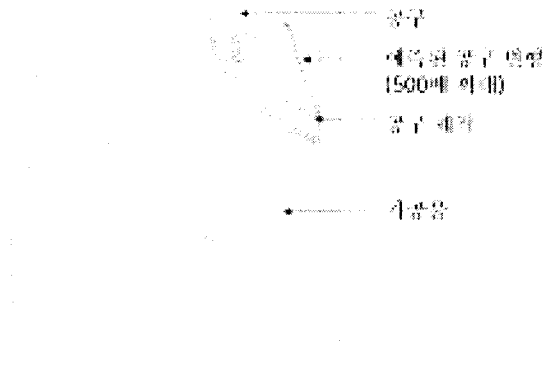


Fig. 8 Screen shot of developed program

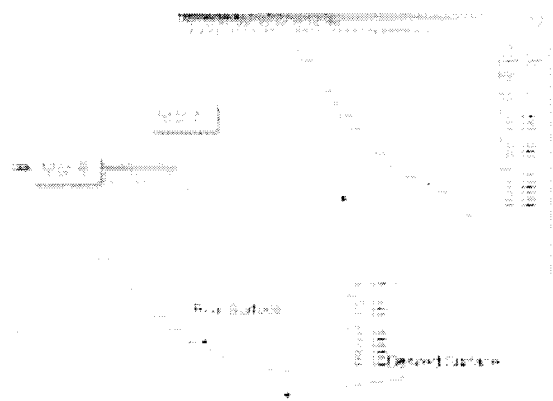


Fig. 9 Surface errors before and after compensation

6. 결론

연구 결과는 아래와 같이 요약 될 수 있다.

1. 볼 엔드밀의 절삭력 예측 모델을 개발 하였다. 그러나 지면 관계로 이에 관한 내용은 생략하였다.

2. 복잡한 형상의 공작물의 가공에 있어서 절삭력을 예측하는데 가장 어려운 점 중의 하나가 바로 절삭날의 어떤 부분이 절삭에 참여하고 있는지를 판단하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 이 문제를 실용적으로 해결하기 위해서 상용의 3D Modeler 를 사용해서 절삭에 참여하는 절삭날의 상한과 하한을 결정할 수 있도록 하였다.
3. 공구의 변형을 예측하고 이를 보상하는 방법을 제시 하였다.
4. 제안된 방법으로 Unigraphics 용의 사용자 모듈을 개발하고 이것의 유효성을 실험을 통하여 입증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 머시닝 센터용 가공공정 검증 및 보정 시스템 개발 과제에 연구 결과 입니다.

참고문헌

1. B. M. Imani, M. H. Sadeghi, M. A. Elbestawi, "An Improved Process Simulation for Ball-end Milling of Sculptured Surfaces," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 1089-1107, 1998.
2. G. Yucesan, Y. Altintas, "Prediction of Ball End Milling Forces," *J. of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 95-103, Feb. 1998.
3. H. Y. Feng, C. H. Menq, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," *J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 95-103, Nov. 1996.
4. P. LEE, Y. Altintas, "Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data," *J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 36, No.9, pp. 1059-1072, 1996.
5. H. Y. Feng, C. H. Menq, "A Prediction of Cutting Forces in The Ball-End Milling Process - I. Model Formulation and Model Building Procedure," *J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 5, pp. 697-710, 1996.
6. G. M. Kimm, P. J. Cho, C. N. Chu, "Cutting Force Prediction of Sculptured Surface Ball-End Milling Using Z-map," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 277-291, 1998.