

유한요소법을 이용한 절삭가공 Burr 예측과 생성특성 연구

황 준*(충주대학교 기계설계학과), 황덕철**(인천대학교 대학원),
우창기*** (인천대학교 기계공학과), 양계준*(충주대학교 전자공학과)

Burr Prediction via Finite Element Method and Burr Formation Characteristics in Metal Cutting Process

Joon Hwang*(ChungJu National Univ.), Duk-Chul Hwang**(Inchon Univ. Graduate School),
Chang-Gi Woo*** (Inchon Univ.), Kea-Joon Yang (ChungJu National Univ.)

ABSTRACT

This paper presents the numerical analysis and experimental verification to know the metal cutting burr formation mechanism in face milling operation. Finite element method are applied to predict the 2-D burr formation process prediction. Face milling process are adjusted to analyze the characteristics of burr shapes according to various cutting conditions. The cutting parameters were investigated with cutting speed, feed rate, depth of cut Through the experiments various burr types are classified according to its shape and properties.

Key Words : Burr Formation Mechanism(버생성기구), Metal Cutting Process(절삭공정), Finite Element Method (유한요소법)

1. 서론

최근, CNC 공작기계 및 머시닝 센터 등의 보급이 활발해짐에 따라 생산가공 현장의 환경은 매우 급격히 자동화되고 있으며, 기술적인 측면에서의 성숙화가 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 오랜전부터 절삭가공 공정에 제기되어 왔던 절삭가공의 버(burr) 발생 현상은 전 공정 자동화의 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 비록 디버링(deburring) 공정기술이 이미 개발되고 있고, 로터리 버(rotary burr) 등의 디버링 공구들도 개발되어 가고 있는 추세에 있으나, 실제 생산현장에서의 사용에는 많은 어려움이 있는 것이 현실이다. 특히, 버의 발생은 공정의 성인화를 이루는데 매우 어려움이 있으며, 결국 기업의 대외 경쟁력 약화로 나타날 수 밖에 없다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 보다 근본적으로 해결하기 위하여 먼저, 버 발생기구에 대한 충분한 이해와 절삭조건과의 상관성을 살펴보기 위하여 유한요소법을 적용한 2차원 버 생성과정을 시뮬레이션하고, 다음, 페이스 밀링가공시 절삭조건에 따른 버 생성특성을 고찰하고자 한다. 이

러한 연구는 향후, 버 발생을 근본적으로 줄일 수 있는 최적의 절삭조건 선정과 실시간 버 모니터링 시스템의 개발에 필요한 기초자료로서 활용하고자 한다.

버 발생기구에 관한 연구들은 크게 실험적 접근 방법과 이론적 접근방법으로 나눌 수 있으며, 먼저, Pekelharig[1]은 실험을 통해 버 형성기구를 설명하였고, Iwata등[2]은 SEM을 이용하여 버 형성을 관찰할 수 있는 장치를 제작하였으며, Hasimura등[3]은 공구각에 따른 버 생성특성에 대하여 연구하였다. 이상의 연구들은 버 발생이 갖는 중요성을 시사하는 중요한 연구들이며, 보다 많은 연구방법론의 개발을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 해석의 용이함을 위해 절삭공정을 2차원으로 정의하고, 대변형 탄소성 문제로 모델링하여 공구진행에 따른 칩의 생성은 물론, 공구의 이탈시 발생하는 버의 생성과정을 시뮬레이션 하였으며, 특히, 절삭깊이를 주된 해석변수로 하여 이에 대한 결과를 고찰하였다. 또한, 실제 생산현장에서 빈번하게 사용되고 있는 페이스 밀링공정을 적용하여 절삭조건에 따른 버의 형태, 특성을 고찰하였다.

2. 유한요소 모델링

공구의 이동에 의한 절삭가공공정의 유한요소해석을 위해서는 대변형 탄소성해석이 필요하다. 특히, 유한요소법을 이용한 절삭시뮬레이션에 있어서 반드시 해결해야 할 문제중의 하나가 실제 절삭가공상태와 같이 공작물로부터 칩이 분리되어 공구경사면을 따라 흘러나가는 현상이며, 이를 공구와 공작물간의 마찰접촉기구를 구성할 수 있는 master-slave surface의 정의와 공구진행에 따른 공작물의 적절한 연성과파괴기준의 설정을 들 수 있다. 연성과파괴기준들은 응력과 변형률의 적분형태로 구성되어 있으며, 이 식에서 얻어진 값이 어느 기준을 초과하면 연성과파괴가 진행되는 것으로 간주한다.

Cockcroft 와 Latham 은 연성과파괴시 소성변형률 경로에 대한 최대 주인장 응력의 영향을 고려한 연성과파괴기준을 제시하였으며, 인장응력이 없다면, $\sigma^* = 0$ 이므로 파괴는 발생하지 않는다는 개념이다.

$$\int_0^{e_p} \sigma^* = C_0 \quad (1)$$

여기서, σ^* 는 최대 인장주응력, e_p 는 유효변형률, C_0 는 재료상수이다.

이와 같은 연성과파괴기준에 의해 파괴된 요소는 격자재구성(remesh) 과정을 통해 기존 유한요소모델에서 제거되며, 이 때 공작물로부터 분리되어 칩의 형태로 배출되는 과정을 나타내는 것이다. 이러한 방법론은 버 형성 과정을 효과적으로 모사할 수 있다.

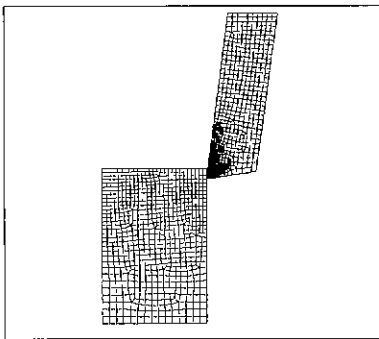


Fig.1 Finite element modeling for burr formation simulation

본 연구의 버 형성과정 모사를 위한 유한요소모델은 Fig.1에 나타난 바와 같이, 공작물과 공구로 나누어 구성하였으며, 강소성 유한요소모델을 적용하고, Newton-Raphson 법에 의해 해를 구하였다.

3. 버 형성기구 예측

버 형성과정 예측을 위해 구성된 유한요소모델을 이용하여, 공작물의 폭은 50.0mm, 절삭깊이는 1.0mm으로 2차원 절삭을 실시할 때, 공구경사면을 따른 칩의 분리, 생성과정과 버의 형성과정을 Fig.2(250 step), Fig.3(450 step)을 각각 나타내었다.

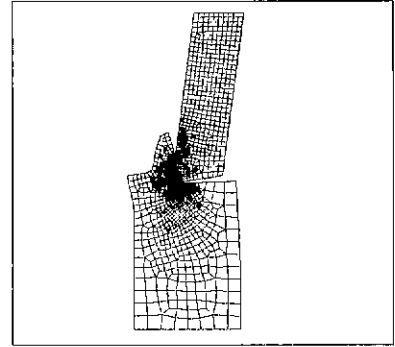


Fig 2 Burr and chip formation simulation on cutting process via finite element method (step 250)

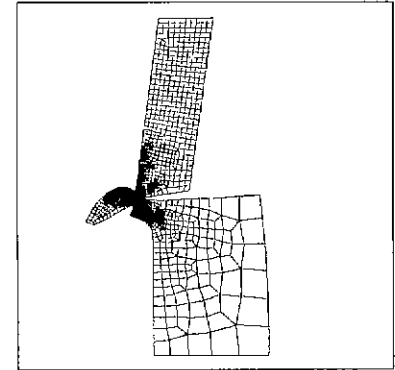


Fig 3 Burr and chip formation simulation on cutting process via finite element method (step 450)

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 정상가공시에는 공구경사면을 따라 칩이 유동하는 동시에 소성전단 파괴가 절삭방향으로 이루어지고 있으며, 특히, 공구가 공작물을 이탈하는 순간의 공작물의 연성과 인성에 의해 칩이 완전히 파단되지 못하고, 공구경사면의 물린 상태에서 공작물의 모서리 부분에서 버의 형성이 이루어짐을 확인할 수 있다.

또한, 절삭진행방향으로 공작물 단면이 완전히 지지되어 있지 않으면, 칩의 발생과 함께 재료의 소성변형이 누적되면서 공작물 모서리부분의 버 높이가 증가하는 것도 확인할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때, 버의 발생 및 그 형태는 칩의 발생기구와 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험장치 구성

유한요소해석에 의한 예측결과와 절삭조건 변경에 따른 버 형성과정을 확인하기 위하여 페이스밀링 가공을 실시하였으며, 가공중 버높이, 표면조도, 절삭력, 공구마멸량, 칩형상 등을 측정하여, 이들 물리량과 버와의 상관성을 고찰하였다.

3축 밀링을 이용하여 페이스 밀링을 수행하고, 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정하였으며, 공구현미경을 이용하여 가공전후의 공구마모량을 측정하고, 이때 발생하는 버의 형상과 크기변화 및 표면조도값을 측정하였다. 절삭조건과의 상관성을 파악하기 위해 절삭깊이, 절삭속도, 이송속도를 변경하며 실험을 수행하였다.

공작물은 SM20C, 공구는 초경인서트(SPCN), 커터바디(EP100, $\phi 100\text{mm}$)를 사용하였으며, 절삭조건은 절삭속도(250~1600rpm), 이송(30~70mm/rev), 절삭깊이(0.2~2.0mm)로 변경하면서 버 생성실험을 수행하였다.

4.2 버의 형태별 분류

이상의 실험조건하에서 절삭가공 수행시 발생한 대표적인 버의 형태를 분류하면 Fig.4 와 같다. 버의 형태는 절삭조건에 따라 다양한 형태를 나타내고 있으며, (a)primary burr, (b)wave burr, (c) uniform burr, (d)secondary burr 등이 페이스밀링시 가장 일반적으로 나타나는 버형태이다.

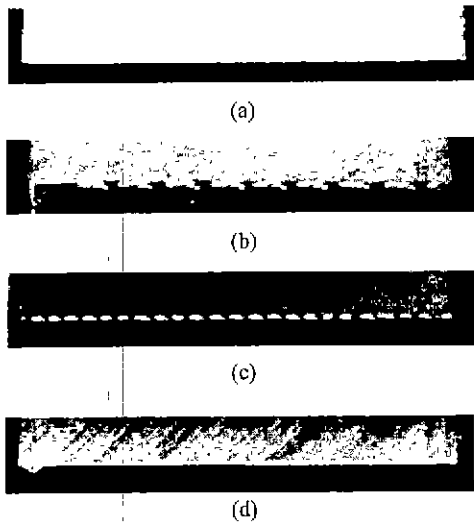
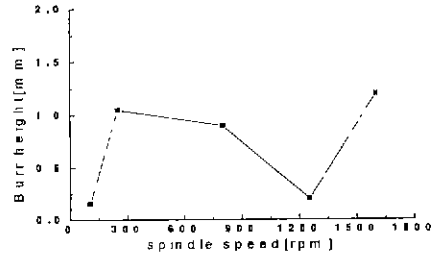


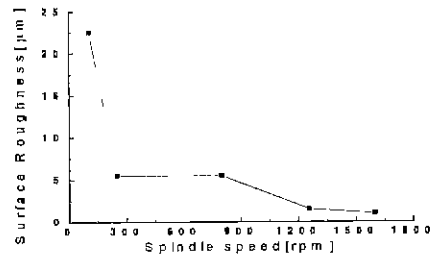
Fig.4 Typical burr shapes via face milling process

4.3 절삭속도에 대한 버 생성특성

절삭속도의 변경에 따른 버의 높이와 표면거칠기의 관계를 Fig.5(a) 와 (b)에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭속도(1250 rpm)에서 버높이가 크게 감소하고 있는데 이는 wave burr가 secondary burr로 변하면서 탈락되었기 때문이다. 또한, 표면거칠기는 절삭속도에 비례하여 향상되고 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig.5 Variation of burr height and surface roughness with respect to cutting speed

4.4 이송속도에 대한 버 생성특성

이송속도의 변경에 따른 버의 높이를 Fig.6에 나타내었다. 70mm/rev에서 버 높이값이 가장 양호하며, 이는 secondary burr의 발생에 의해 높이가 감소한 것이며, 그외는 모두 wave burr로서 일정한 pitch와 큰 두께와 높이를 가지고 있다.

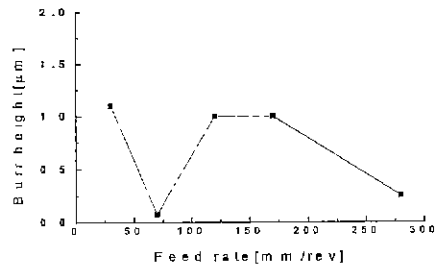


Fig.6 Variation of burr height with respect to feed rate

4.5 절삭깊이에 대한 버 생성특성

절삭깊이는 0.2mm~2.0mm 로 변경하면서 실험할 때, 버의 높이(Fig.7(a))와 표면조도값(Fig.7(b))을 측정하고 그 결과를 각각 나타내었다.

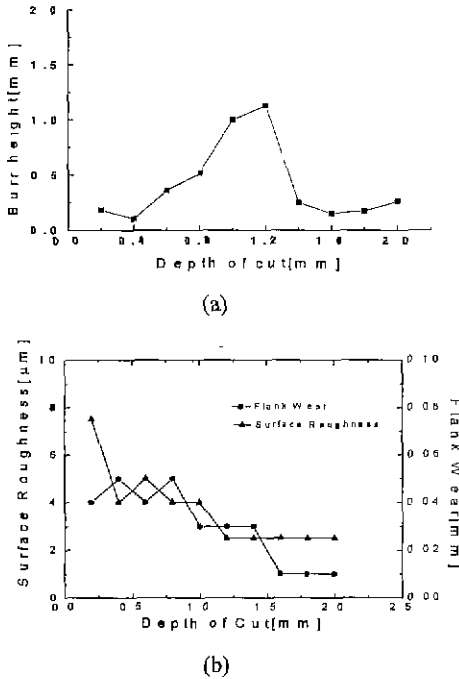


Fig.7 Comparison of burr height and surface roughness with respect to depth of cut



Fig.8 Specified burr shapes (a)wave burr($t=1.0\text{mm}$) (b)secondary burr($t=1.6\text{mm}$)

Figure 7과 8의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 절삭깊이가 0.4mm 이하일 때는 낮은 높이의 primary burr가 발생되나, 절삭깊이 0.6mm~1.2mm 에서는 wave burr의 높이가 절삭깊이에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 1.4mm~2.0mm 까지는 버높이가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 wave burr가 탈락되고 secondary burr 형태를 보

이면서 버높이가 감소하는 것으로 확인되었다. 또한, 표면거칠기의 차이는 크지 않게 나타났으나, 절삭깊이의 증가에 따라 점차적으로 개선되는 결과는 공구 마멸량과 관련이 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 절삭가공의 자동화 공정의 병목현상을 야기시키는 버(burr)의 발생기구를 이해하고, 향후, 효과적인 버의 감소 또는 제거방안을 모색하기 위한 기초연구를 수행하였다. 유한요소법을 적용한 버형성기구 예측과 페이스밀링가공에서의 절삭속도, 이송, 절삭깊이 등의 절삭조건 변화가 버 생성특성에 미치는 영향에 대하여 조사하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2차원 유한요소해석을 통해 버의 생성과정을 모사할 수 있었으며, 공작물의 소성변형, 칩의 생성과정, 버의 생성기구 등을 이해할 수 있었다.
- 2) 밀링가공실험을 통해 primary burr, wave burr, secondary burr, uniform burr 등의 다양한 형태의 버를 얻을 수 있었으며, 특히, 절삭깊이가 증가함에 따라 초기에는 primary burr가, 절삭깊이 1.0mm 부근에서는 강하고 질긴 큰 높이와 일정한 pitch를 갖는 wave burr가 생성되었으며, 1.4mm 이상에서는 1차 burr의 탈락 후 생성된 secondary burr의 형성으로 공작물의 모서리부에 잔류하는 버의 높이는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 저속 절삭속도에서는 uniform burr 형태를 나타내다가, 1250rpm(392.5m/min) 이상의 고속 절삭속도에서는 primary burr가 탈락되고 형성되는 secondary burr 형태를 나타내었다.

참고문헌

1. Pekelharing, A.J., "The exit angle failure in interrupted cutting", Annals of the CIRP, Vol.27, No.1, pp 5-10, 1978.
2. Iwata, K., Ueda, K., Ikuda, K., "A study of mechanism of burr formation in cutting based on direct SEM observation," JSPE, Vol.48, No.4, pp.510-515, 1982.
3. Hasimura, M., Hassamontr, J., Dornfeld, D. A., "Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation", ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol.121, pp.13-19, 1999.