

상향절삭에 의한 깊은 홈 가공시 정밀도 향상에 대한 연구

이상규*, 고성림**

Improvement of the Accuracy in Machining Deep Pocket by Up Milling

Sang-Kyu Lee*, Sung-Lim Ko**

ABSTRACT

The machining accuracy has been improved with the development of NC machine tools and cutting tools. However, it is difficult to obtain a high degree of accuracy when machining deep pocket with long end mill, since machining accuracy is mainly dependant on the stiffness of the cutting tool. To improve surface accuracy in machining deep pocket using end mill, the performance by down cut and up cut is compared theoretically and experimentally. To verify usefulness of up milling, various experiments were carried out. As a result, it is found that up milling produce more accurate surface than down milling in machining deep pocket. For effective application of up milling, various values in helix angle, number of teeth, radial depth of cut and axial depth of cut are applied in experiment.

Key Words : End Mill (엔드밀), Up Milling (상향절삭), Down Milling (하향절삭), Surface Accuracy (표면 정밀도), Cutting force (절삭력), Tool Deflection (공구처짐)

1. 서론

그 동안 NC 기계의 위치정밀도는 비약적인 발전을 이룩해 왔으며, 공작기계와 공구가 발달함에 따라 피삭재의 가공정밀도 또한 꾸준히 개선되어 왔다. 그러나, 절삭작업시 가공정밀도는 공구의 강성에 크게 의존하는 값이어서 엔드밀과 같이 강성이 낮은 공구를 이용할 때에는 높은 정밀도를 얻기가 매우 어렵다.

공구의 처짐을 발생하지 않게 하려면 절삭력의 발생을 억제해야 하는데, 절삭력은 절삭물에 비례하여 증감하는 값이므로 정밀한 부품을 가공하기 위해서는 생산성을 낮추어야 하므로 비용이 증가하게 된다. 이에 따라 공구의 형상이나 가공조건을 적절히 선정하여 가공오차를 가능한 한 작

게 유지하려는 연구가 진행되어 왔으나, 생산성과 정밀도를 모두 만족시킬 수 있는 대책을 제시하지는 못 했다.

지금까지의 연구결과를 살펴보면, 엔드밀 가공시 상향절삭보다는 하향절삭이 유리하다는 견해가 지배적인데 이는 무엇보다도 상향절삭시 과대절삭의 위험이 있다는 점 때문이다. 그 밖에도 상향절삭은 날의 절입시 칩두께가 매우 작아서 표면을 문지르는 현상이 발생하기 때문에 마모가 빨리 진행되고 표면조도가 악화되는 경향을 갖는다는 점과 피삭재를 들어올리는 경향이 있기 때문에 피삭재와 공구가 충돌할 위험이 있다는 점도 큰 단점으로 지적되어 왔다.^[1,2,3]

그러나, 이러한 기존의 비교결과는 대부분 1900년대 중반에 수평형 밀링 머신에서 커다란

* 건국대학교 대학원
** 건국대학교 기계설계학과

직경을 갖는 엔드밀을 이용하여 얻은 결과로서 현재의 가공환경과는 큰 차이가 있다. 먼저, 머시닝 센터의 강성이 크게 개선되었으며, 수직형이므로 피삭재가 위로 들려질 염려가 없다. 또한 초경공구의 등장에 따라 헬릭스각과 날수가 증가되어 절삭력의 경향이 크게 바뀌었으며 공구의 길이 또한 증가하는 경향을 갖는다.

따라서 본 연구에서는 기하학적인 접근을 통하여 상향절삭과 하향절삭시 발생하는 절삭력의 차이를 해석하였다. 또한 절삭실험을 통하여 다양한 공구형태와 절삭조건에 변화가 절삭기동과 표면오차에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다.

2. 가공조건에 변화에 따른 측면가공시 가공정밀도 측정

2.1 가공방향에 따른 절삭력의 변화

엔드밀에 작용하는 절삭력을 미소절삭날에 대한 반경방향 절삭력과 접선방향 절삭력으로 나누어 생각하면, 상향, 하향절삭방법 간의 절삭력 차이를 쉽게 이해할 수 있다. Fig.1은 엔드밀을 단면방향으로 잘랐을 때 절삭날에 작용하는 미소절삭력을 접선방향으로의 미소절삭력 성분, dF_t 와 법선방향으로의 미소절삭력 성분, dF_n 로 표현한 것이다. 회전방향이 바뀔 때, 날부에 작용하는 접선방향 절삭력은 공구의 회전과 반대방향으로 엔드밀에 작용한다. 엔드밀에 존재하는 헬릭스각에 의하여 미소절삭날의 각위치 θ 가 축을 따라 변화하므로, 모든 미소절삭력을 공구 진행방향과 법선방향에 대하여 고정된 x, y 좌표계를 기준으로 좌표 변환하여 모두 합하면, 상향절삭에 대하여 다음과 같은 형태의 계산식을 유도할 수 있다.^[4]

$$F_x = \sum (dF_t \times \cos \theta - dF_n \times \sin \theta) \quad (1)$$

$$F_y = \sum (dF_t \times \sin \theta + dF_n \times \cos \theta) \quad (2)$$

동일한 방법으로, 상향절삭시의 절삭력을 계산하기 위하여 다음과 같은 식을 수립하였다.

$$F_x = \sum (-dF_t \times \cos \theta - dF_n \times \sin \theta) \quad (3)$$

$$F_y = \sum (-dF_t \times \sin \theta + dF_n \times \cos \theta) \quad (4)$$

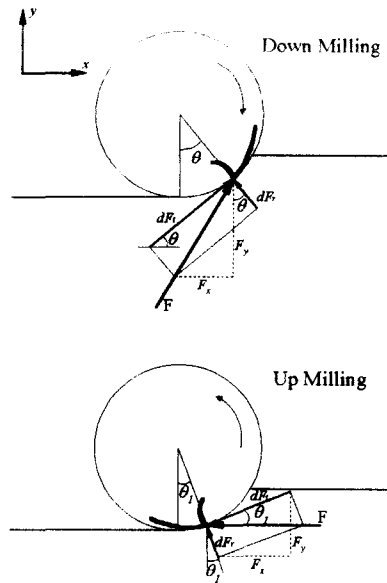


Fig. 1 Geometrical Comparison of Infinitesimal Force between Up Milling and Down Milling

일반적인 측면절삭의 경우, 절입각, θ_{cut} 는 90° 를 넘지 않으므로 좌표변환에 사용되는 값과 값은 항상 양의 값을 갖는다고 가정한다. 또한, 미소절삭 성분 dF_t 과 dF_n 도 절삭저항에 해당하므로 항상 양의 값을 갖는다. 따라서 하향절삭시에는 식(1)과 같이 공구에 작용하는 반경방향의 미소절삭력과 접선방향의 미소절삭력이 서로 상쇄되어 이송방향의 절삭력, F_x ,를 감소시키는 효과가 있다. 반대로 상향절삭에서는 식 (4)와 같이 법선방향으로 작용하는 배분력, F_y ,에서 dF_t 와 dF_n 의 상쇄가 일어난다. 이와 같이 헬릭스각을 따라 발생하는 미소절삭력의 합력이 서로 상쇄되는 효과로 인하여, 대체적으로 측면절삭시 하향절삭에서는 배분력이 이송분력보다 상당히 크게 발생하고, 상향절삭에서는 이송분력이 배분력보다 크게 발생하는 경향을 갖는다.

측면 가공시, 표면의 오차는 주분력 방향의 치짐량에는 별 상관없이 배분력 방향의 치짐량에 의하여 결정되므로^[5], 배분력 방향의 치짐을 억제해야만 가공정밀도가 우수한 표면을 얻을 수 있다. 이 때문에 기존의 하향절삭방법을 이용할 경우, 표면오차를 최소화하기 위해서는 측면방향 절입깊이가 매우 작은 절삭조건하에서 최종정삭을 행하

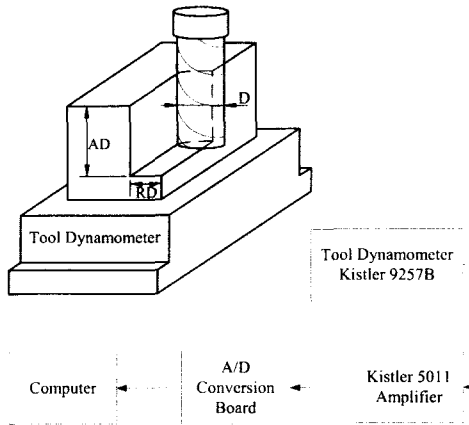


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Setup

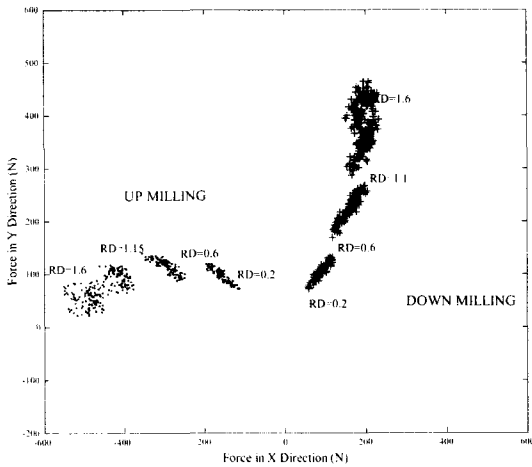


Fig. 3 Cutting Force in Up and Down Milling with Various Radial Depth (Feed Rate = 0.1mm/rev, Helix Angle = 50°, Axial Depth = 16mm, 6 Teeth)

여 배분력을 감소시킴으로써 공구의 치짐을 억제할 필요가 있으나, 이 경우 생산성이 낮아진다는 단점이 있다.

상향절삭의 경우에는, 배분력이 음의 방향으로 작용하여 공구가 피삭재쪽으로 치지기 때문에 과대절삭이 발생하므로 최종정삭에는 적합하지 않다는 것이 기존의 연구결과였다.^{11,13} 그러나 Fig.1에서 볼 수 있듯이 상향절삭시 미소절삭날의 각위치가 θ_1 과 같이 매우 작을 경우, y 축 방향에 대한 미소절삭력은 0 이 되며, $\theta < \theta_1$ 이면 $\cos\theta \gg \sin\theta$

이므로 식(4)로부터 y 축 방향에 대한 미소절삭력이 양의 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서, 상향절삭과 하향절삭시 절삭력의 차이를 알아보기 위하여 실험을 수행하였다.

실험을 위하여 현대정공의 SPT-V18S 머시닝 센터를 사용하였으며, Kistler 사의 9257B 공구 동력계와 전용앰프를 사용하여 절삭력을 측정한다. 측정된 절삭력은 A/D Board 를 통하여 PC 로 저장되며 각 채널당 3000Hz 로 샘플링하였다. 사용된 피삭재는 S45C 이며, 직경 8mm 의 초경공구를 사용하여 측면가공을 수행하였다. 표면오차는 1 μ m 의 분해능을 갖는 전자식 다이얼게이지를 사용하여 측정하였다. Fig.2 에 실험장비를 나타내었다.

Fig.3 은 반경방향의 절입깊이를 0.1mm 에서 1.6mm 까지 증가시키면서 절삭실험을 수행하여 얻은, 엔드밀의 회전방향에 따른 절삭력의 변화경향이다. 하향절삭에서는 절입깊이가 커짐에 따라 배분력, F_y , 가 단조증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 상향절삭에서는 이송방향 절삭력, F_x , 는 절입깊이의 증가에 따라 단조증가하지만, 배분력, F_y , 는 반경방향 절입깊이 RD 가 약 0.1D 일 때까지 증가하다가 다시 감소하며, RD 가 0.2D 로 증가하더라도 양의 값을 갖는다. 배분력, F_y , 가 양의 값을 가질 경우에는 과대절삭을 방지하는 효과가 있다. 따라서, 상향절삭에서 적절한 절입깊이로 가공할 경우, 하향절삭에 비하여 가공오차를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 상향절삭시 반경방향의 절입깊이에 따른 가공정밀도의 변화

Fig.4 와 5 는 상향절삭시 반경방향의 절입깊이에 따른 과대절삭 경향을 살펴보기 위하여, Fig.2 에서 RD 로 나타낸 반경방향의 절입깊이를 변화시키면서 절삭을 수행했을 때의 절삭력 분포와 공구의 치짐으로 인하여 표면에 발생한 오차측정 결과이다. Fig.4 에서 표면의 오차에 직접적인 영향을 주는 배분력은 절입깊이가 0.1D 일 때와 0.15D 일 때에는 양의 값을 가지며, 0.2D 로 증가할 때는 미소하게 음의 값을 가지는 것으로 측정되었다.

이와 같은 실험을 통하여 얻은 표면의 오차측정 결과를 살펴보면, Fig.5 와 같다. 상향절삭의 경우에서 절입깊이가 0.15D 일 때, 배분력은 공구를 피삭재로부터 밀어내는 방향으로 미소하게 작용하기 때문에 오차가 매우 적을 것으로 예상했으나

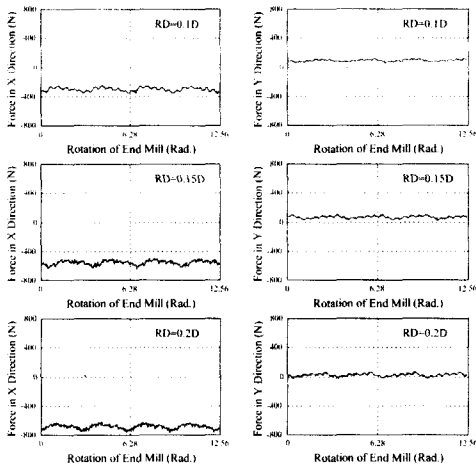


Fig. 4 Comparison of Cutting Force in X and Y Direction in Up Milling with Various Radial Depth (Feed Rate = 0.12mm/rev, H.A. = 50°, AD = 2D, 6 Teeth, RD = 0.1, 0.15, 0.2D)

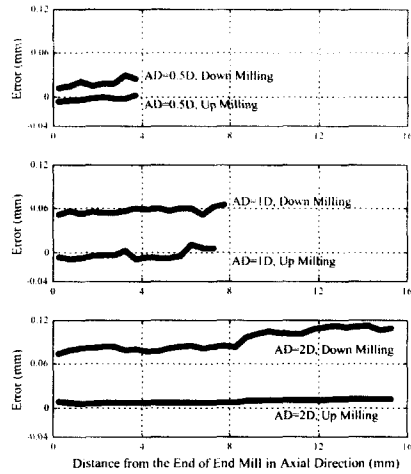


Fig. 6 Comparison of Surface Accuracy in Up Milling and Down Milling with Various Axial Depth (Feed Rate = 0.12mm/rev, Helix Angle = 50°, AD = 0.5, 1, 2D, 6 Teeth, RD = 0.125D)

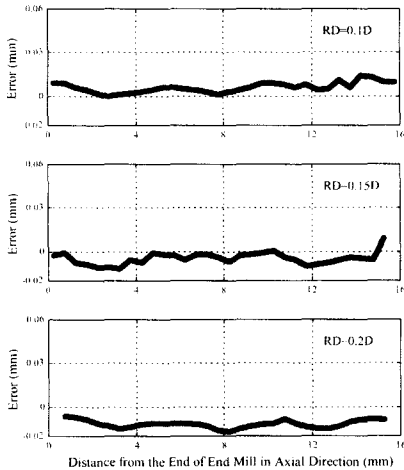


Fig. 5 Comparison of Surface Accuracy in Up Milling with Various Radial Depth(Feed Rate = 0.12mm/rev, Helix Angle = 50°, Axial Depth = 16mm, 6 Teeth, RD = 0.1, 0.15, 0.2D)

실제로는 미소한 과대절삭이 관찰되었다. 이와 같이 절삭력과 표면오차의 방향이 절삭력과 반대가 되는 이유는 측정된 절삭력이 공구에 작용하는 미소절삭력의 합력이라는 사실에서 찾을 수 있다. 즉, 절삭력의 합력이 양의 값을 갖는다 하더라도, 절삭날의 일부분에는 음의 절삭력을 가지는 영역

이 발생하기 때문에, 이와 같은 오차를 유발하는 것으로 보인다. 이 때문에, 동일한 실험조건에서 상향절삭에서 배분력이 50N 미만일 경우에는 항상 과대절삭이 발생하였고, 배분력이 100N 가량으로 증가했을때만 과대절삭이 발생하지 않았다. 하향절삭의 경우에는 절입깊이에 따라 가공오차도 배분력, F_p , 과 마찬가지로 단조증가하였다.

2.3 상향절삭시 축방향의 절삭깊이에 따른 가공정밀도의 변화

Fig.6은 반경방향의 절입깊이를 0.125D로 고정시킨 상태에서, Fig.2에서 AD로 나타낸 축 방향의 절삭깊이와 회전방향을 변화시켰을 때 발생하는 가공오차를 측정된 그림이다. 그 결과를 보면 동일한 가공조건에서 절삭방향에 따라 정밀도에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

하향절삭의 경우에는, 축방향의 절삭깊이가 증가함에 따라 배분력이 크게 증가하기 때문에 표면오차도 크게 증가하였다. 그러나 상향절삭의 경우에는, 배분력의 크기가 하향절삭에 비하여 월등히 낮기 때문에 가공오차가 매우 작았다.

이 때, 상향절삭에서는 축방향의 절삭깊이가 증가할수록, 오히려 과대절삭이 감소하여 표면의 정밀도가 개선되는 경향을 볼 수 있다. 그 원인은, 축방향의 절삭깊이의 증가로 인하여 가공량

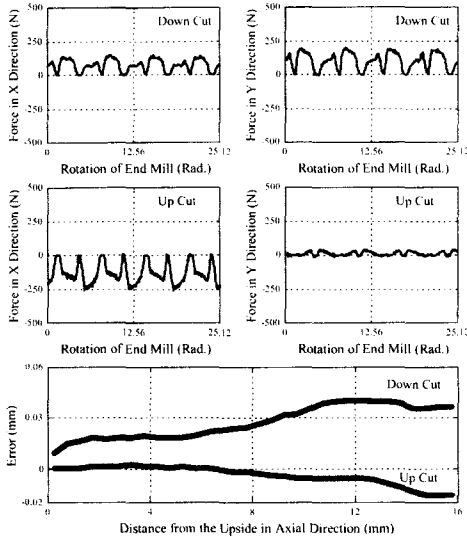


Fig. 7 Cutting Force and Surface Accuracy in Up Milling and Down Milling by 2 Teeth End Mill (Feed Rate = 0.12mm/rev, Helix Angle = 30°, AD = 16mm, 6 Teeth, RD = 1mm)

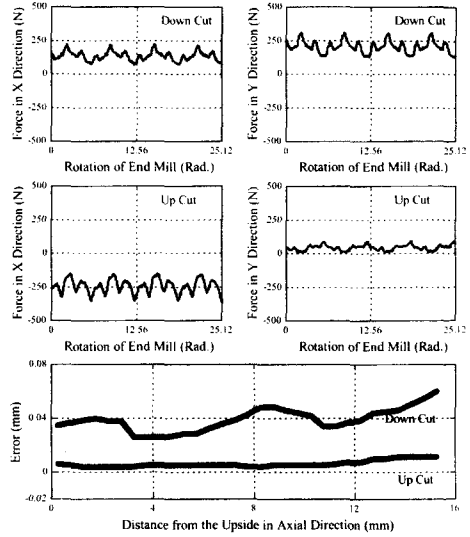


Fig. 8 Cutting Force and Surface Accuracy in Up Milling and Down Milling by 3 Teeth End Mill (Feed Rate = 0.12mm/rev, Helix Angle = 60°, AD = 16mm, 6 Teeth, RD = 1mm)

이 증가하기 때문에, 배분력의 크기가 약 40N 에서 80N으로 증가하여 공구의 처짐량이 증가했기 때문이다. 따라서, 축방향의 절삭깊이, AD,가 작을 경우에는 이송량을 증가시켜서 배분력, F_y ,를 증가시키면 과대절삭을 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

2.4 공구형상에 따른 가공정밀도 변화

2 날, 3 날, 6 날짜리 엔드밀에 대하여 동일한 절삭조건에 대하여 절삭실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 공구의 형상은 2 날의 경우 헬릭스각 30°, 3 날은 50°, 6 날은 50°의 헬릭스각을 갖는다. 공구의 강성은 엔드밀의 형상에 따라 서로 다른 값을 가지며 이는 공구변형에 의하여 가공정밀도에 직접적인 영향을 미친다.^[7] 공구 직경은 8mm이며, 그 밖의 절삭조건은 모두 동일하다. 단, 이송량은 날당이송량을 0.02mm로 일정하게 설정하였다.

Fig.7은 2 날짜리 엔드밀에 대하여 상향절삭과 하향절삭을 수행할 때 발생하는 절삭력과 표면오차를 나타낸 실험결과이다. 날의 개수가 2개이고 헬릭스각도 작기 때문에 단속절삭이 이루어진 결과, 절삭력의 편차가 매우 크다. 이러한 배분력의

편차로 인하여 하향절삭의 경우 가공오차가 매우 클 뿐 아니라, 가공된 표면의 진직도가 나쁘다. 상향절삭에서는 배분력이 큰 쪽으로 감소하는 대신 이송분력은 반대방향으로 크게 증가하였다. 배분력이 전체적으로 매우 작거나, 음의 값을 갖기 때문에 과대절삭이 공구 끝단에서 발생하였다.

Fig.8은 3 날짜리 엔드밀에 의한 절삭실험 수행 결과이다. 회전당 이송량의 증가로 인하여 절삭력은 2 날에 비하여 약간 증가한 것을 알 수 있다. 절삭력이 0으로 감소하는 구간이 발생하지 않는 것은 날의 개수의 증가와 함께 헬릭스각이 증가했기 때문이다. 만일 30°의 헬릭스각을 갖는 3 날짜리 엔드밀이라면, 동일한 절삭조건에서 절삭력이 0으로 떨어지는 구간을 피할 수 없다.

상향절삭에서 배분력이 2 날의 경우보다 증가한 결과, 과대절삭이 발생하지 않았고 가공오차도 매우 작다. 하향 절삭에 의한 표면오차에는 뚜렷한 굴곡이 발생했는데, 이는 배분력이 린아웃의 영향으로 큰 편차를 갖기 때문에 처짐량이 공구의 회전에 따라 변하고, 그 차이가 표면에 그대로 전사된 결과이다.

Fig.9는 6 날짜리 엔드밀을 이용하여 실험한 결과이다. 2 날짜리 엔드밀에 비하여 편차가 크게

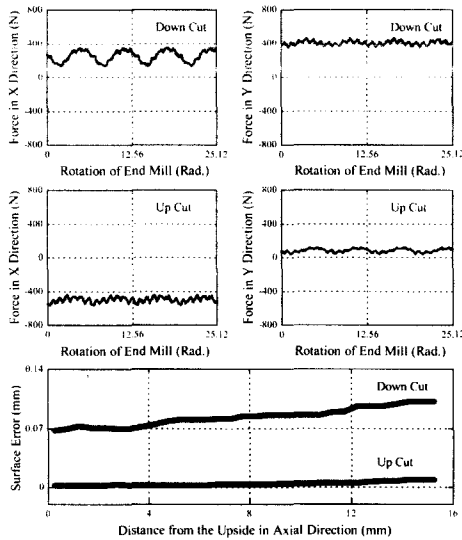


Fig. 9 Cutting Force and Surface Accuracy in Up Milling and Down Milling by 6 Teeth End Mill (Feed Rate = 0.12mm/rev, Helix Angle = 50°, AD = 16mm, 6 Teeth, RD = 1mm)

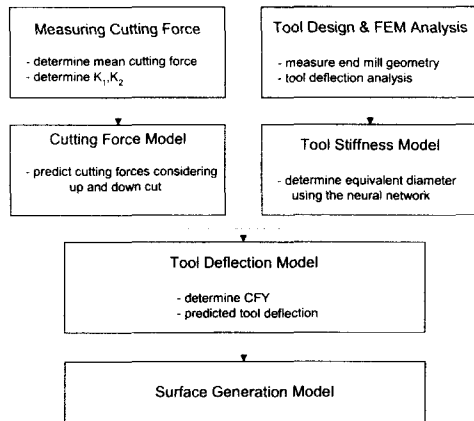


Fig. 10 Flow Chart for Surface Generation Simulation

감소한 대신 평균 절삭력의 크기는 세 배 정도 증가했는데 이는 날 당 이송량을 일정하게 설정하였으므로, 가공량이 세 배 증가했기 때문이다. 그러나 최대 절삭력은 2 배 정도 밖에 증가하지 않았는데, 이는 날의 증가로 인하여 절삭력의 편차가 감소하기 때문이다. 여섯날 엔드밀의 하향절삭에서 뚜렷이 발견되는 특징은 배분력의 편차가 2 날이나 3 날에 비하여 월등히 작기 때문에 오차의

진직도가 크게 향상된 점이다. 그러나, 상향절삭의 경우에 비하여 배분력이 매우 크기 때문에 매우 큰 가공오차가 발생하였다.

상향절삭의 경우에는 이송분력 방향으로 매우 큰 절삭력이 작용하고, 배분력방향으로 두 날에 비하여 상당히 큰 100N 내외의 절삭력이 작용하는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 약간의 오차를 유발하기는 하지만, 과대절삭의 발생을 억제할 수 있으므로 정밀가공을 위해서는 보다 안정적인 절삭조건이라고 할 수 있다. 공구의 회전방향에 상관없이 날의 개수가 많기 때문에 표면의 진직도는 뛰어난을 알 수 있다.

3. 깊은 홈의 정밀가공을 위한 가공조건 결정

지금까지의 절삭실험 결과를 통하여 적절한 조건에서 상향절삭을 수행할 경우 매우 정밀한 표면을 가공할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 깊은 홈의 정밀가공에 적절한 공구형상과 가공조건을 선정하기 위하여 다양한 공구형상과 가공조건에 대하여 실험을 수행하고 그 결과를 비교하면 가장 신뢰성 높은 가공조건을 결정할 수 있다. 그러나, 실험을 위하여 다양한 공구형상을 갖는 엔드밀을 제작하는 것은 경제적으로 지나치게 많은 비용이 필요하므로, Kline 의 비절삭저항 모델과 Sutherland 가 제안한 공구의 처짐을 고려한 절삭력 예측모델을 기반으로 하여 Fig.10 과 같은 구조를 갖는 절삭 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다.^[4,5,6] 개발된 프로그램은 공구형상에 따른 강성 예측을 위해서 Ko.에 의하여 제시된 신경망을 이용한 공구강성모델을 이용하였다.^[7] 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 얻어진 절삭력 예측값은 Fig. 11 과 같이 다양한 절삭조건에 대하여 실제 실험값과 매우 잘 부합하였으므로 그 타당성은 매우 뛰어나다고 말할 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 공구의 형상과 절삭조건이 절삭력에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 공구 형상 결정

Ko.의 연구에 의하면 동일한 공구반경을 갖는 엔드밀의 경우, 날의 개수가 증가할수록 엔드밀의 강성은 내접원의 직경이 증가함에 따라 크게 증가한다.^[7] 이 때문에 동일한 절삭력이 엔드밀에 작용

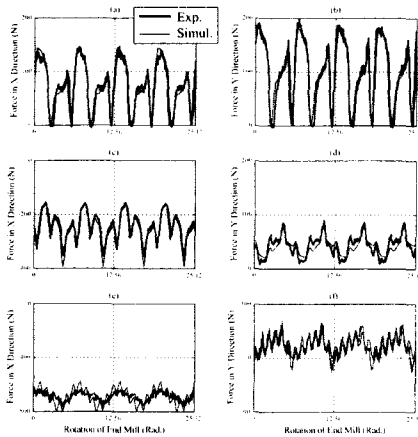


Fig. 11 Comparison between Simulated Force and Tested Force with Various Cutting Condition ((a),(b) : 2 Teeth, H.A. = 30°, RD = 0.1D, Feed Rate = 0.04mm/rev, Down Milling, (c),(d) : 3 Teeth, H.A. = 50°, RD = 0.1D, Feed Rate = 0.6mm/rev, Up Milling, (e),(f) : 6 Teeth, H.A. = 50°, RD = 0.2D, Feed Rate = 0.12mm/rev, Up Milling)

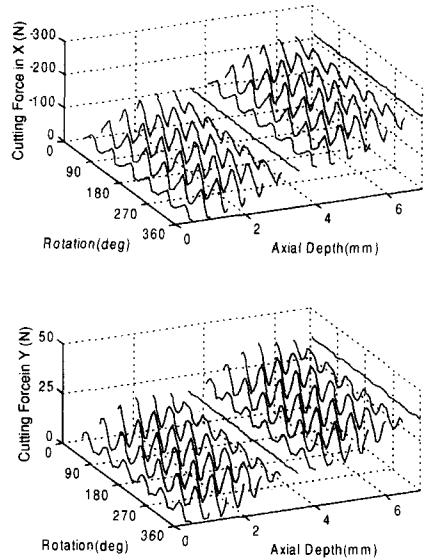


Fig. 12 Simulated Force in Up Milling with Increment of Axial Depth (6 Teeth, Helix Angle = 50°, RD = 0.1D, Feed Rate = 0.12 mm/rev)

할 때, 날의 개수가 많을수록 공구의 처짐은 적게 발생한다. 공구의 처짐에 의하여 표면오차가 발생하므로, 동일한 절삭력이 작용한다고 가정하면 날의 개수가 많을수록 가공오차는 감소하게 된다.

헬릭스각이 커지면, 날의 개수가 증가하는 것과 마찬가지로 동일한 절삭조건에서 더 많은 날이 한꺼번에 절삭에 참여한다. 이로 인하여 절삭력의 평탄화현상이 발생하고, 소음과 표면오차가 감소하는 경향을 갖게 된다.

Fig.12는 런아웃이 없다고 가정하고 모든 조건이 동일하고 축방향 절삭깊이만 증가할 때, 축방향 절삭깊이의 증가에 따른 절삭력의 변화이다. 공구의 회전에 따른 절삭력의 편차는 AD의 증가에 따라, 일정한 주기를 가지고 증가와 감소를 반복하고, 축방향 절삭깊이, AD가 3.51mm, 7.03mm 일 때 절삭력의 편차가 0이 되는 것을 알 수 있다. 또한 절삭깊이의 증가에 따라, 가공되는 부피는 선형적으로 증가하므로 평균절삭력은 일정한 기울기를 가지고 증가하는 것을 알 수 있다.

실제로는 런아웃이 존재하기 때문에 절삭력의 편차가 0이 될 수는 없지만, 축방향 절삭깊이, D_z 가 식 (5)와 같을 때 절삭력의 편차는 최소가

된다. 기하학적으로는 축방향으로 절삭날이 반복되는 거리이다.

$$D_z = a \frac{\pi D}{N \tan \alpha_h} \quad (5)$$

단, D는 공구직경, N은 날 수, α_h 는 헬릭스각, a=1,2,3....

식 (5)에서 a가 1일때의 D_z 값은 축방향으로의 날간 간격을 의미하며, 이 간격이 클수록 절삭력의 최대편차가 증가하는 경향을 갖는다. 이 때, 헬릭스각이 작을수록, 날의 개수가 적을수록, 그리고 공구직경이 클수록 축방향으로의 절삭날간의 간격 D_z 가 커진다는 것을 알 수 있다. 절삭력의 최대편차가 클수록 표면의 굴곡이 심해지므로, D_z 를 최소화하기 위한 노력이 필요하다. 날의 개수가 많을수록 공구의 강성이 증가할 뿐만 아니라^[7], 절삭력의 편차도 감소시킬 수 있다. 헬릭스각이 클수록 절삭력의 최대편차는 감소한다.

Fig.13은 회전당 이송량이 같을 경우, 날의 개수가 증가함에 따른 절삭력의 최대편차의 경향을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 식(5)에서 a=(정수-0.5)로 증가할 경우 회전에 따른

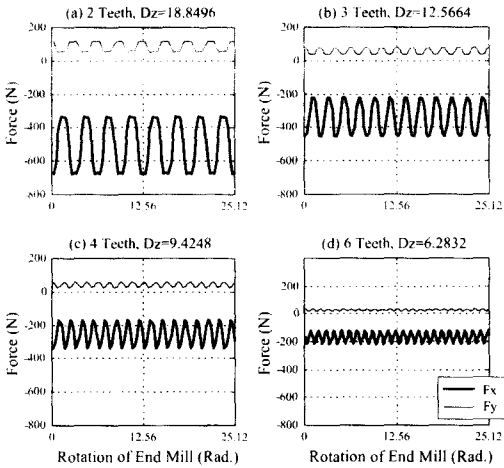


Fig. 13 Simulated Force in Up Milling with Maximum Variation of Force($H. A. = 45^\circ$, $RD = 0.1D$)

절삭력의 편차는 최대가 된다. D_z 가 날의 개수에 따라 변화하므로, 절삭력의 최대편차가 발생하는 절삭깊이, AD 가 모두 달라서 평균절삭력의 크기는 서로 약간 다르지만, 날의 개수가 증가함에 따라 절삭력의 편차는 큰 폭으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 절삭력의 편차가 감소하게 되면 표면에 발생하는 오차의 진직도를 향상시키는 효과가 있다. 따라서, 날의 개수가 많을수록 진직도가 높고, 가공오차가 작은 표면을 얻을 수 있다. 그러나 실제로는 공구에 런아웃이 존재하기 때문에, 절삭날의 개수가 많아져도 표면에 약간의 굴곡이 남아 있게 된다.

3.2 절삭조건 결정

과대절삭의 위험이 없다는 점에서 하향절삭은 광범위한 절삭에 사용되어 왔다. 그러나, 정밀가공의 개념으로 생각하면 매우 우수한 표면 정밀도를 얻을 수 있는 상향절삭 방법을 활용하기 위한 노력이 필요하다.

Fig.6에서 볼 수 있듯이 축방향 절삭깊이가 작을 때는 하향절삭에서도 가공오차가 크지 않다. 이는 가공하는 부피가 상대적으로 작기 때문이다. 그러나 축방향 절삭깊이가 증가할수록, 하향절삭에서는 가공오차가 크게 증가하며, 상향절삭의 필요성이 증대된다. Fig.12에서 볼 수 있듯이 평균절삭력은 축방향의 절삭깊이에 따라 단조증가하지만, 상향절삭의 경우에는 그 크기가 매우 작으므로 깊

은 홈의 가공시에도 가공오차를 큰 폭으로 줄일 수 있다.

반경방향의 절입깊이는 Fig.3으로부터 절삭력이 가장 크게 작용하는 $0.1D \sim 0.15D$ 내외의 값이 과대절삭을 방지할 수 있다는 면에서 가장 적절하다고 할 수 있다. 공구의 직경이 증가하면 가공량이 증가하므로 절삭력의 크기가 증가하지만, 공구의 강성도 함께 증가하므로 반경방향의 절입깊이를 변화시키지 않더라도 가공오차에는 큰 변동이 없다. 만일 축방향의 절삭깊이가 $2.5D$ 이상으로 매우 클 때는 가공되는 피삭재의 부피가 매우 크므로, 반경방향의 절입깊이를 $0.1D$ 보다 약간 작게 설정하여 평균절삭력을 약간 감소시키면 가공오차를 적절하게 감소시킬 수 있다.

그러나, 본 연구에서 얻어진 상향절삭에서의 반경방향 추천 절삭깊이는 실험에 사용된 S45C에 해당하는 절삭조건이므로, 알루미늄이나 금형강과 같이 재료의 절삭성이 크게 변화할 경우에 대해서는, 추후의 연구를 통하여 절삭거동을 분석할 필요가 있다고 생각된다.

3.3 상향절삭의 적용

이상의 연구와 실험으로부터 측면가공에서 상향절삭시 표면형상 정밀도가 하향절삭에 비하여 매우 우수함을 보였다. 그러나 앞선 많은 연구로부터 하향절삭의 공구수명이나 가공면조도의 장점으로 인하여, 이미 하향절삭이 보편화되어 있다 [12,13]. 그러나 서론에서 언급한대로 이와 같은 고정 관념은 가공량이 많고 수평형 밀링 가공에서의 상향절삭시의 단점으로 인한 것이다. 상향절삭의 효율적인 적용을 위해서는 본 연구의 결과로부터 한정된 반경방향 절삭깊이($RD=0.1D \sim 0.15D$)를 사용한 정삭가공으로 최종면을 가공하면, 매우 효율적으로 정밀한 깊은 홈 가공을 수행할 수 있다. 이를 위하여 CAM에서 NC 코드 작성을 위한 새로운 모듈로 적용하거나, 수작업에 의한 조작이 필요하다.

4. 결론

1. 엔드밀의 측면절삭시, 상향절삭과 하향절삭 실험을 통하여 공구의 형상과 가공조건의 변화에 따른 절삭력과 가공오차의 변화경향을 분석하고, 절삭 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 그 타당성

을 검증하였다.

2. 깊은 홈을 가공할 경우에는 상향절삭을 통하여 가공오차를 크게 줄일 수 있으며, 반경방향의 최적절삭깊이는 $0.1D \sim 0.15D$ 이다. 또한 엔드밀의 날의 개수가 많고 헬릭스각이 클수록 진직도가 높고 가공오차가 작은 표면을 얻을 수 있고, 축방향 절삭깊이가 증가함에 따라 평균절삭력은 단조 증가하지만 절삭력의 편차는 일정한 주기로 증감을 반복한다.

참고문헌

1. M. E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process," Transactions of the ASME, Vol. 63, pp.667-700, 1941.
2. M. E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process Part II-Down Milling," Transactions of the ASME, Vol. 67, pp. 233-251, 1945.
3. A. J. P. Sabberwal, "Cutting Forces in Down Milling," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 2, pp. 27-41, 1962.
4. W. A. Kline, R. E. Devor, I. A. Shareef, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
5. J. W. Sutherland, R. E. Devor, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 269-279, 1986.
6. 이상규, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회 97년도 춘계학술대회 논문집, pp. 788-793, 1997.
7. Sung-Lim Ko, Sang-Kyu Lee, "Determination of Tool Stiffness Using Neural Network in End Mill," Technical Paper of NAMRI/SME, MR98-179, 1998.