

측벽 엔드밀 가공에서 형상 정밀도를 고려한 최적 절삭 조건

류시형[#], 최덕기^{*}, 주종남^{**}

Optimal Cutting Condition in Side Wall Milling Considering Form Accuracy

Shi Hyoung Ryu[#], Deok Ki Choi^{*} and Chong Nam Chu^{**}

ABSTRACT

In this paper, optimal cutting condition to minimize the form error in side wall machining with a flat end mill is studied. Cutting forces and tool deflection are calculated considering surface shape generated by the previous cutting such as roughing. Using the form error prediction method from tool deflection, optimal cutting condition considering form accuracy is investigated. Also, the effects of tool teeth number, tool geometry and cutting conditions on form error are analyzed. The characteristics and the difference of generated surface shape in up and down milling are discussed and over-cut free condition in up milling is presented. Form error reduction method through successive up and down milling is also suggested. The effectiveness and usefulness of the presented method are verified from a series of cutting experiments under various cutting conditions. It is confirmed that form error prediction from tool deflection in side wall machining can be used in optimal cutting condition selection and real time surface error simulation for CAD/CAM systems. This study also contributes to cutting process optimization for the improvement of form accuracy especially in precision die and mold manufacturing.

Key Words : Cutting forces (절삭력), Flat end mill (평엔드밀), Form error (형상오차), Optimal cutting condition (최적절삭조건), Side wall machining (측벽가공), Tool deflection (공구변형)

1. 서론

정밀 제조업에서 생산되는 많은 제품들의 품질은 금형의 품질에 크게 의존하며, 금형의 품질은 가공면 거칠기와 형상 정밀도에 의해 결정된다. 공작기계 제어기술의 발달과 새로운 공구 소재의 개발, 공구 코팅기술의 발달은 가공과 이송 속도

의 급격한 증가를 가져왔으며 생산성 향상과 금형의 품질 개선에 크게 기여하고 있다. 고속가공기술의 발달은 기존의 방전, 연삭, 연마 등의 후가공 공정을 최소화하고 있으며, 따라서 금형의 품질은 밀링 가공에서의 가공면 거칠기와 형상 정밀도에 크게 의존하게 되었다. 후가공 공정의 최소화는 금형 납기의 단축과 가공비 절감을 통한 경

[#] 접수일: 2003년 2월 19일; 게재승인일: 2003년 7월 11일
[#] 교신저자: 서울대학교 공학연구소
Email: ryu5449@plaza.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147
^{*} 강릉대학교 정밀기계공학과
^{**} 서울대학교 기계항공공학부

쟁력 제고에 매우 효과적인 대안이 된다.

Martellotti^{1,2}는 상향, 하향 밀링에서의 칩의 생성에 관한 기본 이론을 수립하였으며, Merchant³는 공구 경사각을 고려하여 이차원 절삭에서의 절삭력을 계산하였다. Stabler⁴는 삼차원 절삭에서 칩유동 법칙을 제안하였으며, Kline^{5,6,7}과 Sutherland⁸ 등이 엔드밀링에서의 절삭력, 공구 변형 및 가공면 생성에 대해 연구하였다. 본 논문에서는 Ryu⁹가 제시한 공구변형을 이용한 형상 오차의 예측법을 이용하여 형상 정밀도 관점에서 엔드밀 가공의 최적 절삭 조건에 대해 논의하였다. 금형가공이 황삭, 중삭, 정삭 등의 여러 단계를 거치는 점을 고려하여 이전 가공공정에서 나타난 형상오차를 포함하여 최종 형상오차를 구하였다. 이로부터 가공 조건, 상향/하향의 가공방법에 따른 형상오차에 대해 분석하고 최적화된 가공조건에 대해 검토하였다.

2. 엔드밀 가공에서 형상오차

2.1 임의 형상에서 절삭력과 공구변형

일반적으로 금형가공에서 밀링공정은 황삭, 중삭, 정삭의 단계를 거치게 된다. 따라서 평 엔드밀 가공에서의 정확한 형상 오차를 예측하기 위해서는 이전 단계에서의 가공면 형상 오차를 포함한 절삭력 및 공구변형을 계산하여야 한다.

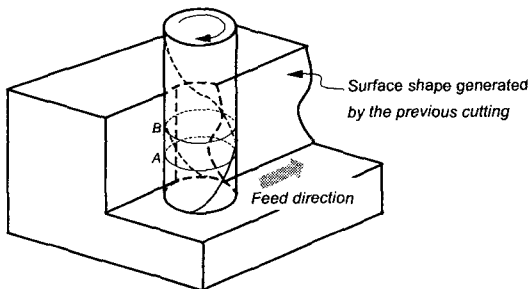


Fig. 1 Entry and exit angle variations according to the previously generated surface shape

Figure 1은 상향밀링에서 전가공으로 형성된 가공면의 형상에 의해 다음 가공에서 공구 위치에 따른 이탈각의 변화를 보여주고 있다. 하향밀링에서는 이탈각 대신 인입각의 크기가 바뀌게 된다. 각 미소 디스크에서 인입, 이탈각의 크기는 식 (1)과 같이 표현된다. 여기에서, $\delta(i)$ 는 축방향으로 i

번째 디스크의 전가공에서의 형상 오차 값이다. Z축을 따라 각 디스크의 인입, 이탈각의 크기를 고려하여 미소날들에 걸리는 절삭력을 합하면 공구 회전각에 따른 최종 절삭력을 구할 수 있다. 공구 변형값은 복합 외팔보의 굽힘변형 모델로부터 공구회전각의 함수로 구하였다.⁹

$$\theta_{cut}[i] = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\text{Max}[0, dr + \delta(i)]}{R}\right) \quad (\text{up milling}) \quad (1)$$

$$\theta_{entry}[i] = \pi - \cos^{-1}\left(1 - \frac{\text{Max}[0, dr + \delta(i)]}{R}\right) \quad (\text{down milling})$$

2.2 절삭조건에 따른 형상오차

엔드밀 가공에서 형상오차는 공구의 직경, 절삭날의 수, 헬릭스각의 크기 등의 공구 조건과 축방향, 반경 방향 절삭 깊이 등의 절삭 조건 그리고 상향, 하향 가공 등 가공 방법에 따라 그 형태와 크기가 달라진다. Figure 2는 두 날과 네 날 엔드밀의 상향 과도절삭에서의 칩 부하를 나타낸다. 두 날 엔드밀의 경우에는 한 날이 가공면 생성점을 지날 때 다른 날이 절삭에 참여하고 있지 않아 절삭력이 0에 가까워져 형상 오차는 거의 발생하지 않는다. 그러나, 축방향 절삭깊이와 반경방향 절삭깊이가 깊어질 경우에는 헬릭스를 따라 공구 위치각이 달라지므로 가공면의 안쪽으로 절삭력을 받는 절삭날들이 존재하게 되어 공작물을 오버컷하는 현상이 발생한다. 네 날 상향가공의 경우에는 그림에서 보듯이 한 날이 가공면 생성선을 지날 때 이전 날이 공작물 방향으로 큰 절삭력을 받게 되어 오버컷량이 커지게 된다.

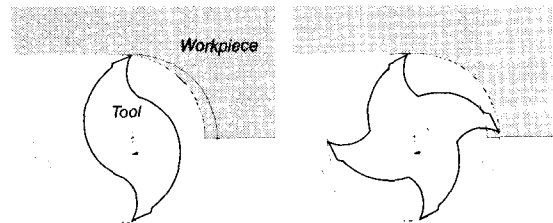


Fig. 2 Two-fluted and four-fluted end mills

Figure 3은 직경 10 mm의 공구로 반경방향 절삭깊이 5 mm인 상향 밀링을 가정할 때 절삭깊이에 따른 형상 오차를 시뮬레이션한 것이다. 본 연구 전체에 걸쳐 시뮬레이션과 실험에 사용된 공구의 직경은 10 mm이다. 축방향 절삭깊이에 상관없

이 모든 절삭 조건에서 가공면을 오버컷하는 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 따라서 반경방향 절입량이 큰 포켓 가공이나 과도한 황삭 조건에서는 네 날 엔드밀에 의한 상향가공은 피해야 한다.

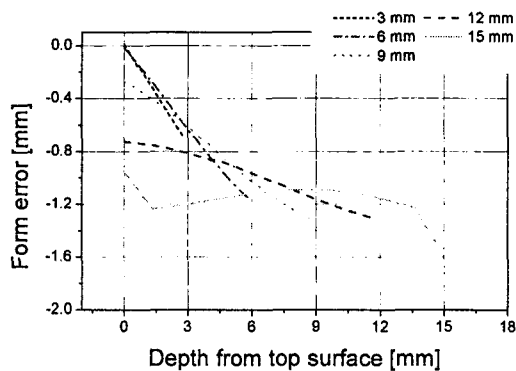


Fig. 3 Form error according to variation of axial depth of cut. (up milling, 4 flutes, 5 mm radial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

Figure 4는 반경방향 절삭깊이 변화에 따른 네 날 상향가공에서의 형상 오차를 보여준다. 절입량이 작은 경우에는 절삭력의 크기가 작아 형상 오차가 크게 발생하지 않으나 절입량이 커져 두 날 이상이 절삭에 참여하게 되면 절삭력의 방향이 가공물 쪽으로 크게 작용하여 공작물 오버컷 양이 급격히 증가하게 된다.

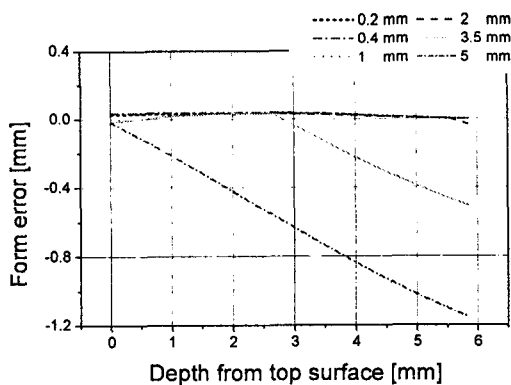


Fig. 4 Form error according to variation of radial depth of cut. (up milling, 4 flutes, 6 mm axial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

Figures 5, 6은 두 날 평 엔드밀을 이용한 상향

절삭에서 반경방향 절삭깊이 변화와 축방향 절삭깊이 변화에 따른 가공면 형상 오차를 시뮬레이션한 결과이다. 반경방향 절삭깊이가 작은 경우에는 상향가공의 경우에도 가공면 오버컷이 발생하지 않고 상대적으로 하향가공에 비해 작은 형상 오차가 발생함을 알 수 있다.

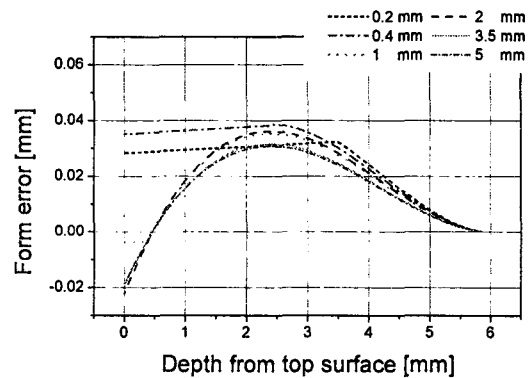


Fig. 5 Form error according to variation of radial depth of cut. (up milling, 2 flutes, 6 mm axial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

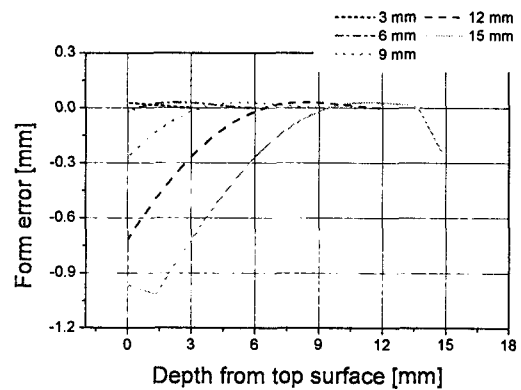
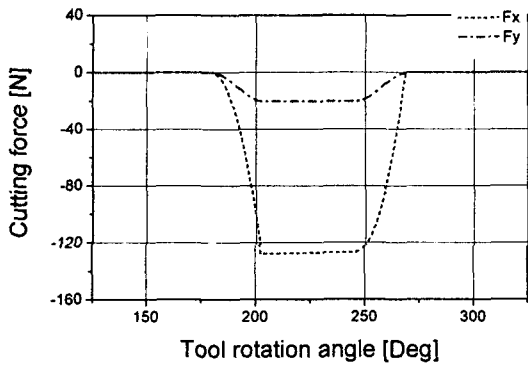


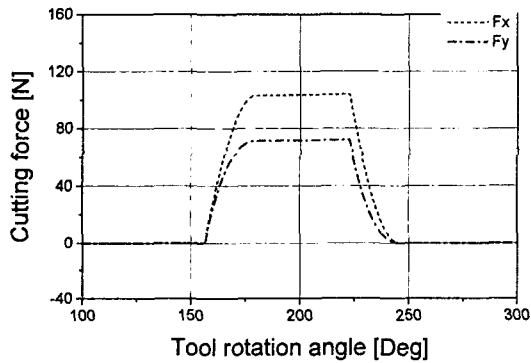
Fig. 6 Form error according to variation of axial depth of cut. (up milling, 2 flutes, 5 mm radial depth, and 0.05mm feed per tooth)

Figure 5에서 반경방향 절삭깊이가 0.2 mm와 0.4 mm의 경우에 가공면 형상 오차의 최대값이 직선의 형태를 띠면서 표면쪽으로 갈수록 다소 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 반경방향 절삭깊이가 작은 경우의 절삭력 형태를 나타내는 Fig. 7을 통해 설명된다. 형상 오차를 지배하는 이송에 수직인 방향의 절삭력을 보면 상향가공에서의 절삭력이 하향가공에서의 절삭력에 비해 매

우 작고, 최대 절삭력의 크기가 일정하게 유지되는 구간이 존재함을 알 수 있다.



(a) up milling, 2 flutes, 10 mm axial depth, 0.4 mm radial depth, and 0.05 mm feed per tooth



(b) down milling, 2 flutes, 10 mm axial depth, 0.4 mm radial depth, and 0.05 mm feed per tooth

Fig. 7 Cutting forces with low immersion ratio

절삭력이 이와 같은 형태를 갖는 것은 Fig. 8의 절삭기구로부터 설명할 수 있다. Figure 8은 반경방향 절삭깊이가 작은 상향가공에 해당하는데, 절삭을 시작하고 공구가 회전함에 따라 칩의 두께가 점점 커지고 절삭에 참여하는 절삭날의 길이가 길어져 절삭력은 증가하게 된다. 그러나 공구의 하단부가 절삭을 끝내면서 절삭력의 크기는 일정한 값을 유지하게 되는데, 그 이유는 칩 부하와 절삭에 참여하는 절삭날의 길이가 공구 축을 따라 이동할 뿐 그 크기는 바뀌지 않기 때문이다. 공구가 계속 회전함에 따라 칩의 부하는 점점 작아지게 되고 절삭력의 크기도 줄어들게 된다. 이러한 절삭력의 형태가 공구변형에 그대로 반영되고 따라서 가공면 형상 오차도 동일한 양상으로 결정된

다. 절삭력은 일정한데 반해 형상 오차가 표면쪽으로 갈수록 줄어드는 것은 공구의 위쪽에서의 공구변형의 크기가 아래쪽에 비해서 작기 때문이다.

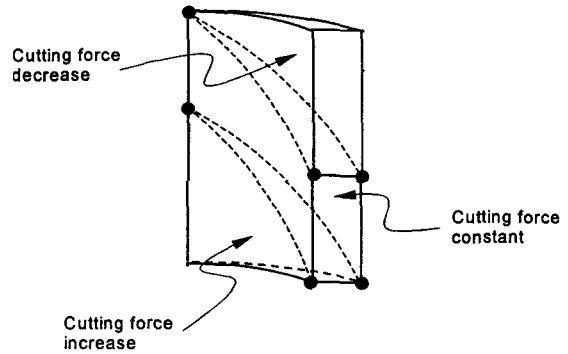
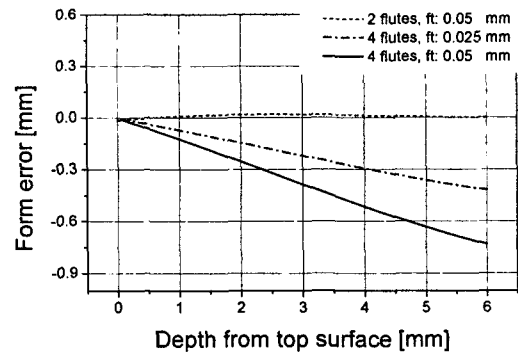
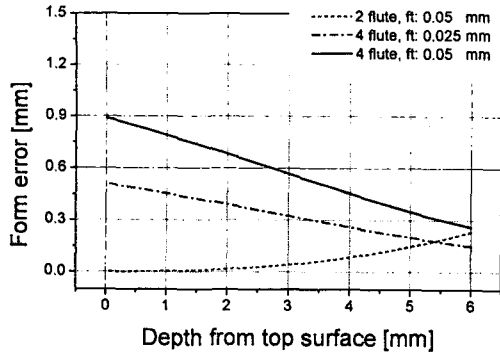


Fig. 8 Chip load variation with low immersion ratio

Figure 9는 축방향 절삭깊이가 6 mm, 반경방향 절삭깊이가 5 mm의 가공조건으로 절삭할 때의 두 날과 네 날 엔드밀에서의 형상 오차의 차이를 보여준다. 날 당 이송과 이송 속도가 각각 동일한 조건에 대하여 형상 오차를 비교하였다. 반경방향 절입량이 큰 관계로 네 날 엔드밀이 가공면 생성점을 지날 때 절삭부하가 크게 작용하여 두 날 엔드밀에 비하여 큰 형상 오차가 발생하였다. 두 날 엔드밀의 경우에는 상향가공이 하향가공에 비해 상대적인 절삭력의 크기가 작아 형상 오차가 작게 발생함을 알 수 있고, 표면 근처에서는 절삭력의 방향이 반대가 되어 가공면 오버컷이 발생함을 볼 수 있다. 하향가공에서는 표면 근처에서 형상 오차가 0에 가깝고 깊이 방향으로 갈수록 포물선의 형태로 형상 오차가 증가하고 있음을 볼 수 있다.



(a) up milling, 6 mm axial depth, and 5 mm radial depth



(b) down milling, 6 mm axial depth, and 5 mm radial depth

Fig. 9 Comparison of form errors according to teeth number

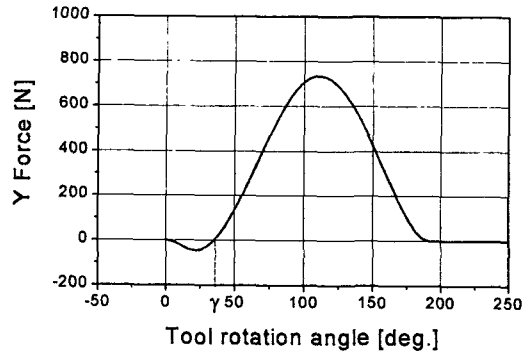
절삭 초기에, 이송에 수직인 방향의 절삭력은 절삭 계수 k_r 즉 공구를 공작물에서 밀어내려는 힘 때문에 음의 값을 갖게 되고, 공구가 회전함에 따라 접선방향의 힘의 크기가 커져 양의 값으로 변하게 된다. 절삭력의 부호가 음에서 양으로 변하는 공구 회전각의 크기를 Fig. 10의 (a)에서 보듯이 γ 라 하자. 반경방향 절삭깊이와 축방향 절삭깊이에 의해 정해지는 공구/칩 중심각 δ 와 절삭날 후퇴각 β_0 는 식 (2)와 같이 구해진다. 만일 δ 가 γ 보다 작게 되면, 절삭력이 항상 공구를 공작물에서 밀어내는 방향으로 작용하여 축방향 절삭깊이에 관계없이 오버컷이 발생하지 않게 된다. 이때에는 공구 회전각이 δ 에서 β_0 까지 칩부하가 동일하며 절삭하는 날의 위치만 공구축을 따라 이동하게 된다.

$$\delta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{d_r}{R}\right)$$

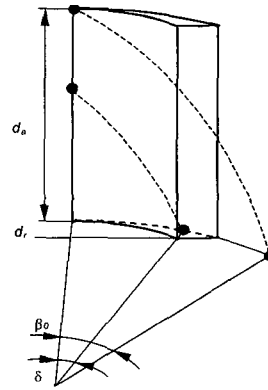
$$\beta_0 = \frac{\tan \alpha}{R} d_a \quad (2)$$

따라서 공구변형량이 공구 위치각 δ 에서와 유사하게 유지되어 형상 오차의 크기도 일정한 값을 갖게 된다. δ 가 γ 보다 크게 되면 공구가 공작물의 안쪽으로 변형하는 방향으로 절삭력이 작용하게 되므로 가공면을 오버컷할 가능성이 있다. 이 경우에는 축방향 절삭깊이에 의해 정해지는 β_0 의 크기를 고려해 보아야 하는데, β_0 가 γ 보다 작게 되면 공구변형이 공작물을 오버컷하는 방향으로 작용하더라도 절삭날이 가공면 생성위치를 벗어나

있기 때문에 오버컷이 발생하지 않게 된다.



(a) Y directional cutting force in slot cutting



(b) chip load variation according to axial and radial depths of cut in up milling

Fig. 10 Over-cut in up milling

즉, 상향가공에서 가공면의 오버컷은 δ 와 β_0 가 모두 γ 보다 클 경우에 발생하게 된다. δ 가 β_0 보다 클 경우에는 절삭깊이가 Z_{crit1} 에서 오버컷이 시작되어 절삭깊이가 0인 곳까지 오버컷량이 증가하게 되며, δ 가 β_0 보다 작을 경우에는 절삭깊이가 Z_{crit1} 에서 Z_{crit2} 까지 오버컷량이 증가하다가 Z_{crit2} 에서 0까지는 Z_{crit1} 에서의 오버컷으로 일정한 값을 유지하게 된다.

$$Z_{crit1} = \frac{(\beta_0 - \gamma) R}{\tan \alpha}$$

$$Z_{crit2} = \frac{(\beta_0 - \delta) R}{\tan \alpha} \quad (3)$$

이상의 논의로부터 상향가공에서 발생하는 공작물

의 오버컷에 관해서 Table 1 과 같이 정리할 수 있다.

Table 1 Over-cut condition in up milling

| Angle relationship | Over-cut | Over-cut area | Trend |
|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| $\delta < \gamma$ | No | . | . |
| $\delta > \gamma > \beta_0$ | No | . | . |
| $\delta > \beta_0 > \gamma$ | Yes | $Z_{crit1} < Z < 0$ | Increase |
| $\beta_0 > \delta > \gamma$ | Yes | $Z_{crit1} < Z < Z_{crit2}$ | Increase |
| | | $Z_{crit2} < Z < 0$ | Constant |

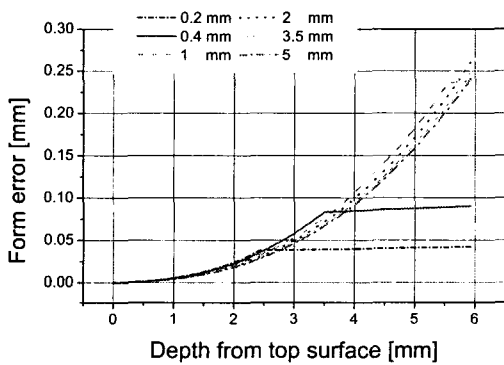


Fig. 11 Form error according to variation of radial depth of cut. (down milling, 2 flutes, 6 mm axial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

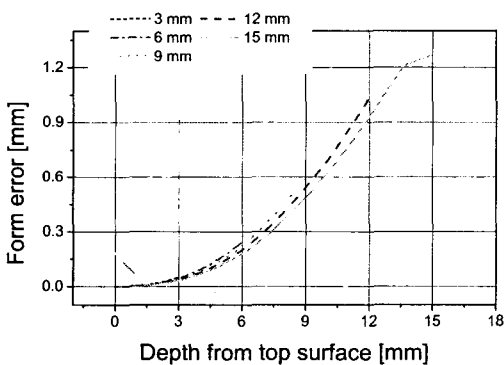


Fig. 12 Form error according to variation of axial depth of cut. (down milling, 2 flutes, 5 mm radial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

하향가공에서는 절삭조건과 공구 날 수에 관계없이 Y 방향의 절삭력이 항상 양의 부호를 가져 공

구가 공작물에서 이탈하게 되므로 공작물의 오버컷 현상은 발생하지 않게 된다.

Figures 11, 12 는 두 날 앤드밀을 이용한 하향가공에서 반경방향 절삭깊이 변화와 축방향 절삭깊이 변화에 따른 가공면 형상 오차를 나타낸다. 두 날 하향가공에서는 반경방향 절입량이 커짐에 따라 형상 오차는 포물선의 형태로 증가하나, 축방향 절삭깊이의 한계로 인하여 두 날 이상의 동시 절삭이 이루어지지 않기 때문에 더 이상 형상 오차는 증가하지 않음을 알 수 있다. 그러나 축방향 절삭깊이가 증가하게 되면 Fig. 12 와 같이 형상 오차가 크게 증가하게 되고, 일정한 절삭깊이 이상이 되면 두 날 이상의 동시 절입이 이루어져 형상 오차의 형태가 꺾이게 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 형태가 되는 것은 동시 절입에 의해 절삭력이 중첩되기 때문이다.

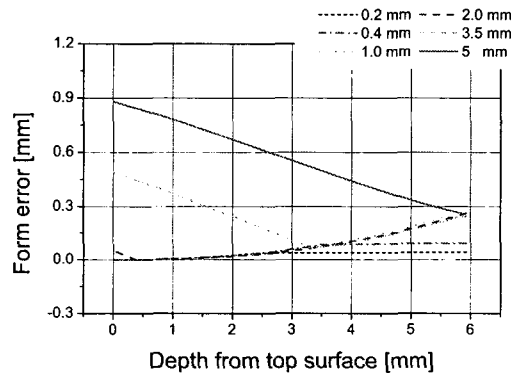


Fig. 13 Form error according to variation of radial depth of cut. (down milling, 4 flute, 6 mm axial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

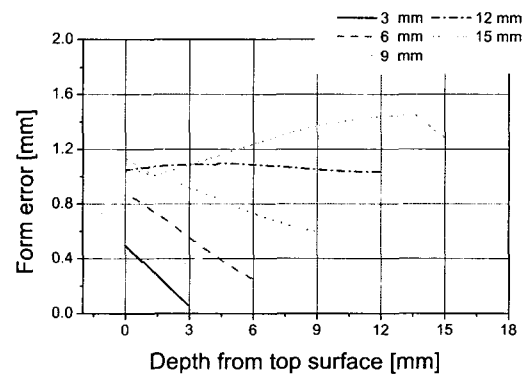


Fig. 14 Form error according to variation of axial depth of cut. (down milling, 4 flute, 5 mm radial depth, and 0.05 mm feed per tooth)

Figures 13, 14는 네 날 하향가공에서 나타나는 가공면 형상 오차의 형태와 크기를 나타낸다. 반경방향 절입깊이가 작은 경우에는 한 날의 절삭에 의해서만 가공면의 형상 오차가 생성되어 그 크기가 작으나, 절입깊이 증가하거나 축방향 절삭깊이가 증가함에 따라 가공면 형상 오차는 급격히 커지게 됨을 볼 수 있다.

2.3 상향, 하향의 교차가공

상향과 하향가공에서의 형상 오차를 비교해 보면, 반경방향 절삭깊이가 작은 경우 즉, 상향가공에서의 오버컷이 발생하지 않는 조건에서는 하향가공에서의 형상오차가 상향가공에 비해 크게 발생하고 이 때의 형상 오차는 상향과 하향이 축벽의 깊이방향으로 서로 반대의 형태를 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 조건에서는 하향과 상향의 교차가공을 통한 형상 정밀도 향상이 가능하다. 하향가공에서는 오버컷이 발생하지 않고 절삭깊이 방향으로 형상 오차가 증가하는 경향을 보이므로, 절삭조건을 미소하게 하여 상향가공으로 가공면을 재절삭하면 형상 오차를 감소시킬 수 있다. 실제로 사출 금형가공에서의 절삭조건에 대해서 살펴보면, 축벽가공에서는 대부분의 경우 하향절삭을 하는데 그 이유는 하향가공이 상향가공에 비해 동적으로 안정하고, 상향가공에서와 같은 오버컷 현상이 발생하지 않기 때문이다. 그러나, 정삭조건에서는 형상 정밀도의 확보를 위하여 상향가공을 하는 경우도 있다. 추천 절삭조건을 보면 직경 10 ~ 12 mm의 평 엔드밀에 대하여, 5 mm의 반경방향 절삭을 할 경우 황삭에서 4.8 mm의 반경방향 절삭을 하고 정삭에서 0.2 mm의 반경방향 절입으로 최종 형상을 완성한다. 날 당 이송량은 0.025 ~ 0.1 mm를 사용하며 모두 하향가공 한다. Figure 15에서 (a)는 실제 금형제작 현장에서 사용하는 절삭조건으로 가공한 경우의 잔류 형상 오차를 시뮬레이션한 결과이다. 정삭이 끝난 후의 최종 형상 오차의 최대값은 99.25 μm 로 예측되었다. (b)는 일차 가공에서 5 mm의 반경방향 절입을 모두하여 절삭하고, 이차 가공은 반경방향 절입없이 하향가공한 경우이다. 최대 형상오차는 71.59 μm 로 예측되었다. (c)는 (b)와 동일한 조건으로 가공한 경우인데, 이차가공에서 하향가공 대신 상향가공 했을 때의 형상 오차의 예측 모양이

다. 최대 형상 오차는 25.38 μm 로 예측되었다.

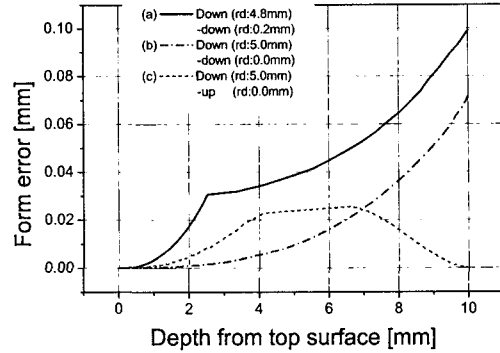


Fig. 15 Form error according to cutting method variation. (10 mm axial depth, 0.05 mm feed per tooth)

이 결과를 검토해 볼 때, 최종 금형의 형상 정밀도 측면에서 보면 현재 금형가공에서 사용되는 절삭조건은 (c)의 절삭조건으로 바뀌는 것이 바람직하다. 일차 가공에서 최종 치수로 반경방향 절입을 할 수 있는 이유는 앞에서 언급했듯이 하향가공에서는 공구가 항상 공작물에서 멀어지는 방향으로 변형하여 원하는 치수 이상으로 가공물을 오버컷하는 현상이 발생할 우려가 없기 때문이다. 정삭조건에서의 상향가공은 형상 오차의 크기를 작게하기 때문에 유리하나 조건에 따라 가공면을 오버컷할 수 있으므로 가공조건을 미리 검토해 보는 것이 필요하다.

3. 실험 및 결과

공구변형을 이용한 형상 오차 예측 방법을 이용하여 금형의 형상 정밀도 향상을 위한 최적 절삭 조건 선정에 관한 실험을 수행하였다. 수직형 머시닝 센터인 대우 ACE-V30을 이용하여 플라스틱 사출 금형강으로 많이 사용되는 KP-4M을 가공하였다. 공구는 고온 열 특성이 우수하고 내마모성이 뛰어나 고경도 금형재의 고속가공에 많이 이용되는 직경 10 mm의 TiAlN 코팅된 두 날 초경 평 엔드밀을 사용하였다. 가공면의 형상 오차는 Somi-cronic사의 Surfscan을 이용하여 측정하였다. Figure 16은 6 mm의 절삭깊이를 0.2 mm의 절입으로 하향 일차 가공한 후, 다시 상향가공으로 반경방향 절입 없이 가공한 후의 형상 오차의 측정값과 예측값을 비교한 그림이다. 크기와 형상

에서 실제 가공면 형상 오차와 유사함을 알 수 있고, 형상 정밀도의 개선에 상향, 하향 교차 가공이 효과적임을 알 수 있다.

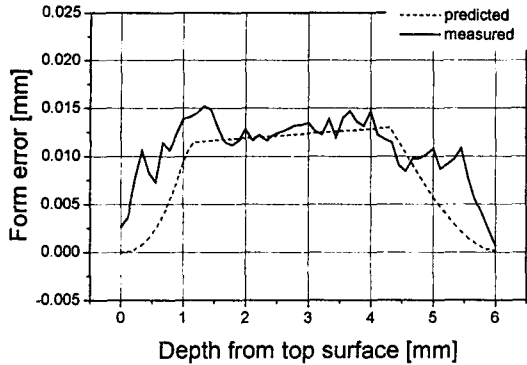


Fig. 16 Form error reduction by successive down-up milling. (1st cut: down milling, 0.2 mm radial depth, 6 mm axial depth, 1000 rpm, and 0.15 mm feed per tooth. 2nd cut: up milling, 0.0 mm radial depth, 6 mm axial depth, 1000 rpm, and 0.025 mm feed per tooth)

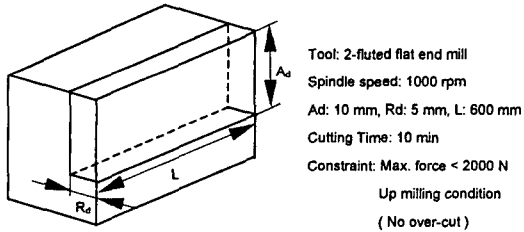


Fig. 17 Test specimen specification and constraint

본 논문에서 제시한 가공면 형상 오차 예측법은 매우 빠르고 정확하며, 이전 가공에 의한 잔류형상의 영향을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 원하는 가공형상과 구속조건을 만족시키는 적절한 가공 조건을 찾는 데 유용하게 이용될 수 있다. 모든 조건을 만족시켜 가공을 최적화한다는 것은 거의 불가능하므로, Fig. 17 에서 보듯이 몇 가지의 제약 조건을 두어 국부적인 최적 조건을 수치적으로 찾는 방법을 사용하도록 한다. 가공은 황삭, 정삭의 두 번의 공정으로 나뉘어 진행된다고 가정하고, 공구가 받아도 좋은 최대 절삭력은 2000 N, 전체 가공시간은 10 분으로 동일하다고 가정한다. 일차 가공에서는 동적으로 안정한 하향가공을 하고 이차의 정삭공정에서는 상향, 하향이

공 모두를 사용할 수 있다고 본다. 상향가공의 경우에는 최대 형상 오차 뿐 만 아니라 가공면 오버컷 여부를 같이 판단해 주어야 한다.

Table 2 Maximum form error variation according to cutting conditions (case 1)

| 1 st cut (down cut, rd: 4.8 mm) | 2 nd cut (down cut, rd: 0.2 mm) | Max. force (N) | Max. form error (μ m) |
|--|--|-------------------|-------------------------------------|
| Feed per tooth (mm) | | | |
| 0.14 | 0.0382 | 2438.66 (x) | 113.91 |
| 0.12 | 0.04 | 2154.40 (x) | 105.66 |
| 0.1 | 0.0429 | 1860.65 | 112.08 |
| 0.08 | 0.048 | 1555.06 | 113.50 |
| 0.06 | 0.06 | 1233.95 | 119.73 |
| 0.05 | 0.075 | 1065.70 | 137.50 |
| 0.04 | 0.12 | 890.68 | 183.25 |

Table 3 Maximum form error variation according to cutting conditions (case 2)

| 1 st cut (down cut, rd: 5 mm) | 2 nd cut (down cut, rd: 0.0 mm) | Max. force (N) | Max. form error (μ m) |
|--|--|-------------------|-------------------------------------|
| Feed per tooth (mm) | | | |
| 0.14 | 0.0382 | 2503.16 (x) | 93.25 |
| 0.12 | 0.04 | 2211.38 (x) | 89.27 |
| 0.1 | 0.0429 | 1909.86 | 86.99 |
| 0.08 | 0.048 | 1596.19 | 87.62 |
| 0.06 | 0.06 | 1266.59 | 91.44 |
| 0.05 | 0.075 | 1093.89 | 99.18 |
| 0.04 | 0.12 | 914.23 | 123.12 |

Table 2 ~ 4 는 가공조건의 변화에 따른 최대 절삭력과 최종 가공면에 잔류하는 형상 오차를 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 볼 때, 요구되는 절삭력 범위내에 있으면서 형상 오차를 최소화하는 가공조건이 Table 4 의 네 번째 절삭 조건임을 알 수 있다. Figure 18 은 이상의 결과를 토대로 각 가공조건에서 최대 형상 오차를 최소화하는 최적화된 조건으로 실제 가공한 경우의 측정값과 예측값을 비교한 그래프이다. 최대 형상 오차의 예측값과 측정값이 잘 일치하고 있음을 알 수

있다. 그러므로 형상 정밀도의 관점에서 현재 금형가공에서 사용되고 있는 case 1의 조건은 case 3의 최적 절삭 조건으로 개선되는 것이 바람직하다.

Table 4 Maximum form error variation according to cutting conditions (case 3)

| 1 st cut (down cut, rd: 5 mm) | 2 nd cut (up cut, rd: 0.0 mm) | Max. force (N) | Max. form error (μ m) | Over-cut (μ m) |
|--|--|-------------------|-------------------------------|------------------------|
| Feed per tooth (mm) | | | | |
| 0.14 | 0.0382 | 2503.16 (x) | 20.02 | -63.96 (x) |
| 0.12 | 0.04 | 2211.38 (x) | 21.02 | -44.76 (x) |
| 0.1 | 0.0429 | 1909.86 | 22.55 | -21.89 (x) |
| 0.08 | 0.048 | 1596.19 | 25.11 | . |
| 0.06 | 0.06 | 1266.59 | 30.71 | . |
| 0.05 | 0.075 | 1093.89 | 37.26 | . |
| 0.04 | 0.12 | 914.23 | 55.31 | . |

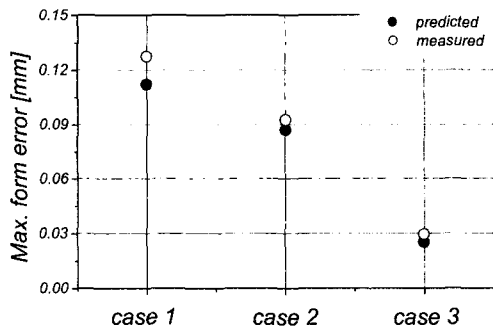


Fig. 18 Maximum form error with respect to cutting condition variation

4. 결론

금형의 측벽 가공에서 가공 정밀도 향상을 위한 최적 절삭 조건의 선정에 관해 연구하였다. 본 논문은 공구변형을 이용한 가공면 형상 오차 예측 방법을 적용하여 평 엔드밀을 이용한 임의 형상 가공에서의 형상 오차를 빠르고 정확하게 예측할 수 있어 다양한 절삭조건의 시뮬레이션을 통하여 최적화된 가공조건을 찾는 데 유용하게 이용될 수 있으며, CAD/CAM 시스템에 적용되어 실시간 형

상 오차 예측에 사용될 수 있다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 평엔드밀 가공에서 황삭 등의 이전 가공에 의해 잔류하는 가공면의 형상을 고려하기 위해 임의 형상 가공에서의 절삭력 및 공구변형을 예측하였다.

2) 반경방향 절삭깊이가 큰 황삭가공 조건에서는 네 날 엔드밀을 사용할 경우 두 날이 동시에 절삭에 참여하게 되어 과도한 절삭력에 의한 공구변형이 발생하기 때문에 두 날 엔드밀에 비해 형상 오차가 크게 발생한다. 그러나 반경방향 절삭깊이와 축방향 절삭깊이가 작은 미세 가공조건에서는 동시에 절삭하는 날이 없으므로, 동일한 날당 이송으로 이송률을 높일 수 있는 네 날 엔드밀이 두 날 엔드밀에 비해 가공 효율과 형상 정밀도의 측면에서 유리하다.

3) 가공면의 형상 정밀도는 가공면에 수직한 방향의 절삭력 성분이 결정하게 된다. 따라서 반경방향 절삭깊이가 작은 정삭 측벽 가공조건에서는 가공면에 수직한 방향의 절삭력이 상대적으로 작은 상향가공이 하향가공에 비해 형상 정밀도가 우수하다.

4) 상향가공에서는 가공조건에 따라 공구변형의 방향이 가공면 쪽으로 향하게 되어 기준면을 오버컷하는 경우가 발생하므로 절삭 조건의 선정에서 이를 유의해야 한다. 하향가공에서는 공구변형의 방향이 항상 가공면 쪽에서 떨어지게 되므로 가공면 형상은 언더컷의 형태가 된다.

5) 금형 가공에 사용되는 다양한 가공조건에서의 공구변형을 통한 형상 오차 시뮬레이션으로부터 형상 오차를 최소화하는 가공조건이 존재함을 보였으며, 실험을 통하여 본 논문에서 제시한 절삭조건이 형상 오차의 감소에 효과적임을 입증하였다.

6) 공구변형을 통한 형상 오차의 예측 방법은 임의 형상 가공에서의 형상 오차를 빠르고 정확하게 예측할 수 있어 최적화된 절삭조건을 찾는 데 유용하게 이용될 수 있으며 상향, 하향의 교차 가공 방법은 금형가공에서의 가공면 형상 정밀도를 효과적으로 개선시킬 수 있다.

5. 참고문헌

1. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling

- Process,” Trans. ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
2. Martellotti, M. E., “An Analysis of the Milling Process, Part II-Down Milling,” Trans. ASME, Vol. 67, pp. 233-251, 1945.
 3. Merchant, M. E., “Basic Mechanics of the Metal Cutting Process,” Trans. ASME, J. of App. Mech., Vol. 11, pp. 168-175, 1944.
 4. Stabler, G. V., “The Fundamental Geometry of Cutting Tools,” Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Vol. 165, pp. 14-26, 1951.
 5. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., “The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts,” Int. J. Mach. Tool Design Research, Vol. 22, pp. 7-22, 1982.
 6. Kline, W. A., and DeVor, R. E., “The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling,” Int. J. Mach. Tool Design Research, Vol. 23, pp. 123-140, 1983.
 7. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Shareef, I. A., “The Prediction of Surface Accuracy in End Milling,” ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
 8. Sutherland, J. W., and DeVor, R. E., “An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems,” Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 108, pp. 269-279, 1986.
 9. Ryu, S. H., “Optimal Cutting Condition is Side Wall Machining Considering Tool Deflection,” Ph.D Thesis, Seoul Nat’l Univ., 2000.