

엔드밀 가공에서 형상 정밀도 향상을 위한 절삭 조건 선정

류시형(서울대 공학연구소), 최덕기*(강릉대 정밀기계공학과), 주종남(서울대 기계항공공학부)

Cutting Condition Selection for Geometrical Accuracy Improvement in End Milling

S. H. Ryu(Res. Inst. of Eng. Sci., SNU), D. K. Choi(Dep. of Pre. Mech. Eng., KNU),

C. N. Chu(Sch. of Mech. and Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

For the improvement of geometrical accuracy in end milling, cutting method and cutting condition selection are investigated in this paper. As machining processes are composed of several steps such as roughing, semi-finishing, and finishing, cutting forces and tool deflection are calculated considering surface shape generated by the previous cutting. The effects of tool teeth numbers, tool geometry, and cutting conditions on the form error are analyzed. Using the form error prediction method from tool deflection, cutting condition for geometrical accuracy improvement is discussed. The characteristics and the difference of generated surface shape in up and down milling are dealt with and over-cut free condition in up milling is presented. The form error reduction method by alternating up and down milling is also suggested. The effectiveness of the presented method is examined from a set of cutting tests under various cutting conditions. This research contributes to cutting process optimization for the geometrical accuracy improvement in die and mold manufacture.

Key Words : End milling (엔드밀링), Tool deflection (공구변형), Cutting condition (절삭조건), Alternating machining (교번가공), Geometrical accuracy (형상정밀도)

1. 서론

금형의 형상 정밀도와 표면 거칠기는 제품의 품질과 직접적으로 연관되어 있다. 공작기계 제작 기술의 발달은 가공과 이송 속도의 급격한 증가를 가져오고 있으며, 생산성 향상과 금형의 품질 개선에 기여하고 있다. 특히 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 경쟁력 제고에 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다. Martellotti^{(1),(2)}는 상향, 하향 밀링에서의 칩의 생성에 관한 기본 이론을 수립하였으며, Merchant⁽³⁾는 공구 경사각을 고려하여 이차원 절삭에서의 절삭력을 계산하였다. Stabler⁽⁴⁾는 삼차원 절삭에서 칩 유동 법칙을 제안하였으며, Kline^{(5),(6),(7)}과 Sutherland⁽⁸⁾ 등이 엔드밀링에서의 절삭력, 공구 변형 및 가공면 생성에 대해 연구하

였다. 본 논문에서는 류⁽⁹⁾가 제시한 공구변형을 이용한 형상 오차의 예측법을 이용하여 형상 정밀도 관점에서 엔드밀 가공의 절삭 조건 선정에 대해 고찰하였다. 금형가공이 황삭, 중삭, 정삭 등의 여러 단계를 거치는 점을 고려하여 이전 가공 공정에서 잔류하는 형상오차를 포함하여 최종 형상오차를 예측하였다. 또한 가공 조건, 절삭날 수, 상향/하향 밀링 등 가공 방법에 따른 형상오차에 대해 분석하고 형상정밀도를 개선시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 엔드밀 가공에서 형상 정밀도

2.1 절삭력과 공구변형

일반적으로 금형가공에서 밀링공정은 황삭, 중삭, 정삭의 단계를 거치게 된다. 따라서 엔드밀링 공정에서의 형상 오차를 예측하기 위해서는 이전 단계에서의 가공면 형상 오차를 포함한 절삭력 및 공구변형을 계산하여야 한다. Figure 1은 상향밀링에서 이전 가공으로 형성된 가공면의 형상에 의해 다음

가공에서 공구 위치에 따른 이탈각의 변화를 보여 주고 있다. 하향밀링에서는 이탈각 대신 진입각의 크기가 바뀌게 되며 식 (1) 로 표현된다. Z 축을 따라 각 디스크의 진입, 이탈각의 크기를 고려하여 미소날들에 걸리는 절삭력을 합하면 공구회전각에 따른 최종 절삭력을 구할 수 있다. 공구변형값은 복합 외팔보의 굽힘변형 모델로부터 공구회전각의 함수로 구하였다.⁽⁹⁾

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

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

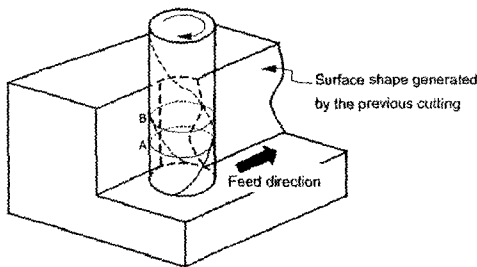


Fig. 1 Entry and exit angle variation due to the previously generated surface shape

2.2 절삭조건에 따른 형상오차

엔드밀 가공에서 형상오차는 공구의 직경, 절삭날의 수, 헬릭스각의 크기 등 공구 조건과 축방향, 반경 방향 절삭 깊이 등 절삭 조건 그리고 상향, 하향 가공 등 가공 방법에 따라 그 형태와 크기가 달라진다. Figure 2는 두 날과 네 날 엔드밀의 상향과도절삭에서의 칩 부하를 나타낸다. 두 날 엔드밀의 경우에는 한 날이 가공면 생성점을 지날 때

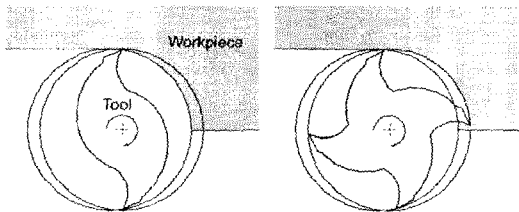
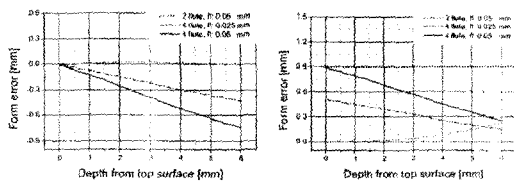


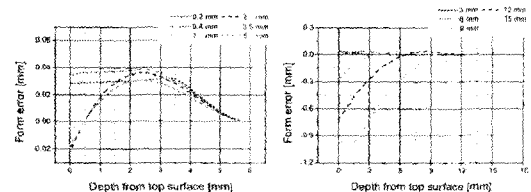
Fig. 2 Two-fluted and four-fluted end milling



(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. 3 Form errors according to teeth numbers

큰 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. Figure 3은 축방향 절삭깊이 6 mm, 반경방향 절삭깊이 5 mm의 가공조건으로 절삭할 때의 두 날과 네 날 엔드밀 가공에서의 형상 오차이다. 날 당 이동과 이동속도가 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 형상 오차가 크게 발생함을 볼 수 있다. 두 날 엔드밀의 경우에는 상향가공이 하향가공에 비해 상대적 절삭력의 크기가 작아 형상 오차가 작게 발생함을 알 수 있고, 표면 근처에서는 절삭력의 방향이 반대가 되어 가공면을 오버컷하는 현상이 발생함을 볼 수 있다. 하향가공에서는 표면 근처에서 형상 오차가 0에 가깝고 깊이가 방향으로 갈수록 포물선의 형태로 형상 오차가 증가하고 있음을 확인할 수 있다. Figure 4는 두 날 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. Figure 4(a)에서 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 칩 부하가 동일하여 최대 절삭력의 크기가 일정하게 유지되는 구간이 존재하기 때문이다.



(a) up milling, 2 flutes, 6 mm axial depth, and 0.05 mm feed per tooth (b) up milling, 2 flutes, 5 mm axial depth, and 0.05 mm feed per tooth

Fig. 4 Form errors according to variation of depth of cut

2.3 상향밀링에서의 오버컷

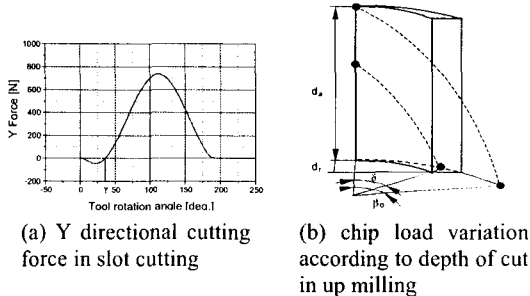


Fig. 5 Over-cut in up milling

$$\delta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{d_r}{R}\right), \quad \beta_0 = \frac{\tan \alpha}{R} d_s \quad (2)$$

절삭 초기에 이송에 수직한 방향의 절삭력은 절삭 계수 k_r 즉 공구를 공작물에서 밀어내려는 성분 때문에 음의 값을 갖게 되고, 공구가 회전함에 따라 칩선방향의 힘의 크기가 커져 양의 값으로 변하게 된다. 절삭력의 부호가 음에서 양으로 변하는 공구 회전각의 크기를 Fig. 5의 (a)에서 보듯이 γ 라 하자. Figure 5의 (b)를 참고하여 반경방향 절삭깊이와 축방향 절삭깊이에 의해 정해지는 공구/칩중심각 δ 와 절삭날 후퇴각 β_0 는 식 (2)와 같이 구해진다. 여기서 α 는 공구 헬릭스 각의 크기이다. 만일 δ 가 γ 보다 작게 되면, 절삭력이 항상 공구를 공작물에서 밀어내는 방향으로 작용하여 축방향 절삭깊이에 관계없이 가공면 오버컷이 발생하지 않게 된다. 이 때에는 공구 회전각이 δ 에서 β_0 까지 칩부하가 동일하며 절삭하는 날의 위치만 공구축을 따라 이동하게 된다. 따라서 공구 변형량이 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 일어나지 않게 된다. 즉, 상향가공에서 가공면의 오버컷은 δ 와 β_0 가 모두 γ 보다 클 경우에 발생하게 된다. δ 가 β_0 보다 클 경우에는 절삭깊이가 식 (3)으로 주어진 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. 이상의 논의로부터 상향가공에서 발생하는 공작물의 오버컷에 관해서 Table 1과 같이 정리할 수 있다. 하향가공에서는 절삭조건

과 공구 날 수에 관계없이 Y 방향의 절삭력이 항상 양의 부호를 가져 공구가 공작물에서 이탈하게 되므로 공작물의 오버컷 현상은 발생하지 않게 된다.

$$Z_{crit1} = \frac{(\beta_0 - \gamma)}{\tan \alpha} R, \quad Z_{crit2} = \frac{(\beta_0 - \delta)}{\tan \alpha} R \quad (3)$$

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 |

2.4 상향, 하향의 교번가공

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, 하향가공 후 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.

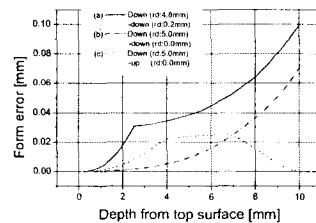


Fig. 6 Form error according to cutting method variation (10 mm axial depth, 0.05 mm feed per tooth)

금형 가공의 추천 절삭조건을 보면, 직경 10 ~ 12 mm의 엔드밀을 이용하여 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 6 에서 (a) 는 실제 금형제작 현장에서 사용하는 절삭조건으로 가공한 경우의 잔류 형상 오차를 시뮬레이션한 결과이다. 정삭이 끝난 후의 최종 형상 오차의 최대값은 $99.25 \mu\text{m}$ 로 예측되었다. (b) 는 일차 가공에서 5 mm 의 반경방향 절입을 모두하여 절삭하고, 이차 가공은 반경방향 절입없이 하향가공한 경우이다. 최대 형상오차는 $71.59 \mu\text{m}$ 로 예측되었다. (c) 는 (b) 와 동일한 조건으로 가공한 경우인데, 이차가공에서 하향가공 대신 상향가공 했을 때의 형상 오차의 예측 모양이다. 최대 형상 오차는 $25.38 \mu\text{m}$ 로 예측되었다. 이 결과를 검토해 볼 때, 최종 금형의 형상 정밀도 측면에서 보면 현재 금형가공에서 사용되는 절삭조건은 (c) 의 절삭조건으로 바뀌는 것이 바람직함을 알 수 있다. 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 형상오차의 크기를 작게하기 때문에 유리하나 조건에 따라 가공면을 오버컷할 수 있으므로 미리 검증해 보는 것이 필요하다.

3. 실험 및 결과

공구변형을 이용한 형상 오차 예측 방법을 이용하여 금형의 형상 정밀도 향상을 위한 절삭 조건 및 가공 방법에 관한 실험을 수행하였다. 수직형 머시닝 센터인 대우 ACE-V30 을 이용하여 플라스틱 사출 금형강으로 많이 사용되는 KP-4M 을 가공하였다. 공구는 TiAlN 코팅된 두 날 초경 평 엔드 밀을 사용하였다. 가공면의 형상 오차는 Somicron 사의 Surfscan 을 이용하여 측정하였다. Figure 7 은 6 mm 의 절삭깊이를 0.2 mm 의 절입으로 하향 일차 가공한 후, 다시 상향가공으로 반경방향 절입없이

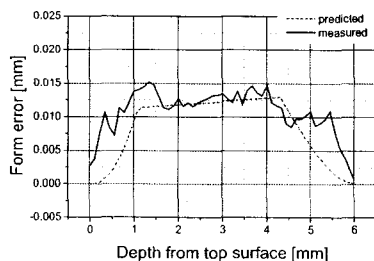


Fig. 7 Form error reduction by successive down-up milling. (1st cut: down milling, 0.2 mm radial depth, 6 mm axial depth, and 0.15 mm feed per tooth. 2nd cut: up milling, 0.0 mm radial depth, 6 mm axial depth, and 0.025 mm feed per tooth)

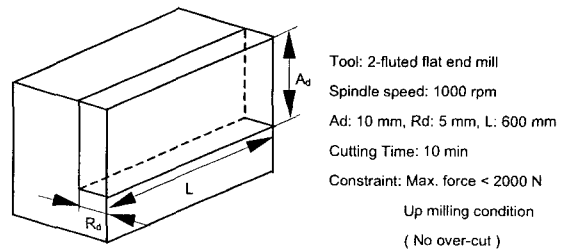


Fig. 8 Test specimen specification and constraint

가공한 후의 형상 오차의 측정값과 예측값을 비교한 그림이다. 크기와 형상에서 실제 가공면 형상 오차와 유사함을 알 수 있고, 형상 정밀도의 개선에 상향/하향 교번 가공이 효과적임을 확인할 수 있다. 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 고려하여 가공을 최적화한다는 것은 거의 불가능하므로, Fig. 8 에서 보듯이 몇 가지의 제약 조건을 두어 국부적인 최적 조건을 수치적으로 찾는 방법을 제시해 보았다.

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 (μm) |
|--|--|-------------------|--|
| 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 (μm) |
|--|--|-------------------|--|
| 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 |

가공은 황삭, 정삭의 두 번의 공정으로 나뉘진행된다고 가정하고, 공구가 받아도 좋은 최대 절삭력은 2000 N, 전체 가공시간은 10 분으로 동일하다고 가정한다. 일차 가공에서는 동적으로 안정한 하향가공을 하고 이차의 정삭공정에서는 상향, 하향가공 모두를 사용할 수 있다고 본다.

Table 2 ~ 4 는 가공조건의 변화에 따른 최대 절삭력과 최종 가공면에 잔류하는 형상 오차를 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 볼 때, 요구되는 가공 부하 범위내에 있으면서 형상 오차를 최소화하는 가공조건이 Table 4 의 네 번째 절삭 조건임을 알 수 있다.

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 | . |

Figure 9 는 이상의 결과를 토대로 각 가공조건에서 형상 오차를 최소화하는 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 1 의 조건은 case 3 의 최적 절삭 조건으로 개선되는 것이 바람직하다.

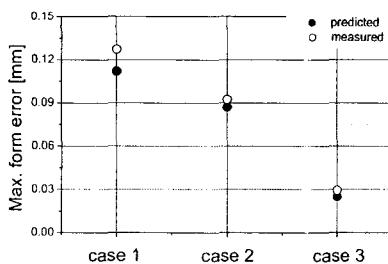


Fig. 9 Maximum form error with respect to cutting condition variation

4. 결론

엔드밀 가공에서 형상 정밀도를 향상시키기 위한 가공 방법 및 절삭 조건에 대해 연구하였다. 절삭 날 수, 가공 깊이, 이송 속도 및 상향/하향의 가공 방법에 따른 형상 오차에 대해 논의하였다. 또한 절삭 공정이 황삭, 중삭, 정삭 등의 단계를 거치는 점을 고려하여 이전 가공에서 잔류하는 가공면 형상을 포함하여 절삭력 및 공구 변형을 계산하였다. 상향 밀링에서 가공면 오버컷에 대해서 고찰하였으며 오버컷을 방지할 수 있는 조건을 제시하였다. 또한 상향/하향의 교번가공을 통하여 형상 정밀도를 개선시킬 수 있음을 보였다. 본 연구 결과는 CAD/CAM 시스템에 적용되어 정밀 금형 제작을 위한 공정 계획 수립에 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다.

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. 류시형, "측벽가공시 공구변형을 고려한 최적 절삭 조건," 공학박사 학위논문, 서울대학교, 2000.