

연질재료의 최적 절삭조건설정에 관한 연구

최상련*, 홍민성**, 신근하**

A Study on the Optimal Cutting Conditions for Mild Materials

Sangryun Choi*, Minsung Hong**, Keunha Shin**

Abstract

Aluminum alloy, which is advantageous to machining and injection, makes a great contribution to shortening delivery time, infection cycle time and reducing expense. This study presents machining conditions for mild materials and describes the difference between theoretical and practical machined surface roughnesses affected by various machining conditions. Machining results have been evaluated and analyzed under varying machining conditions. Special properties of the mild materials have been presented by the quantitative analysis and the optimal machining condition has been proposed for the mild materials.

Keywords: mild material(연질 재료), surface roughness 「표면 거칠기」, cutting condition(절삭조건), pickfeed(피크피드).

1. 서론

최근 산업체에서는 소비자의 새로운 제품에 대한 요구의 빠른 변화에 의한 제품 시장성의 단축으로 대량 생산 방식에서 다품종 소량 생산방식으로의 변화가 요구되고 있다. 기업에 있어서는 제품개발의 납기단축을 통한 기회선점과 생산성 향상을 통한 원가절감의 활동이 시장경쟁력 확보에 중요한 역할로 대두되고 있다. 따라서 금형 가공에 있어서 알루미늄 합금은 기계가공성 및 성형성이 양

호한 점에서 사출성형용 금형에 이용되어 납기단축, 금형 개발비의 절감, 성형 사이클의 단축에 공헌하고 있다. 보통 사출성형용 금형은 가격이 높아 시작(試作)·소량생산 등의 경우에는 성형 품의 단가가 상대적으로 상승한다. 때문에 일반적으로 "개발금형"이라 칭하는 단납기·소량 생산에 있어서는 절삭가공을 위주로 한 새로운 금형제작 기술이 요구된다.⁽¹⁾

이러한 연질재료에서 「표면 거칠기」는 이론적으로는 볼랜드밀의 선단 반경과 절삭계적(절삭피드, 피크피드)에

* (주)삼성전기 금형개발실

** 아주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

의해서 정해지기 때문에 공구소재 및 가공조건에 의한 표면 거칠기의 차이는 없을 것으로 생각되지만 실제로는 공작물과 절삭날끝간의 상대적인 위치와 움직임, (2) 절삭날부의 상태, 마모 등의 영향으로 커다란 차이를 발생하고 있다.

본 연구에서는 이러한 연질재료의 가공에 관한 연구로 이론적 「표면 거칠기」와 실제 가공에 있어서의 복합적 요인이 작용된 「표면 거칠기」와의 차이에 관해서 연구하고 절삭조건 변화에 따른 가공결과를 분석, 평가함으로써 최적의 가공조건 도출은 물론, 연질재료의 가공특성을 정량화하여 데이터베이스화하는데 지침이 되고자 한다. 현재 널리 보급되어 있는 머시닝센터의 가공조건 설정 범위 내에서 최적의 「표면 거칠기」를 얻기 위한 공구재질 선정 및 가공조건 설정에 따른 가공면 거칠기의 추이를 분석함으로써 제품의 품질과 생산성 향상에 도움을 주고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 표면 거칠기의 구성요소

절삭이라는 것은 가공재료에 절삭공구를 이용하여 칩(chip)을 발생시키는 것으로 이상적인 절삭이 이루어지면 가공경로의 밀도, 즉 피크피드(pickfeed)에 따른 이론적 표면 거칠기의 수학적 표현을 산출할 수 있다. 그러나 표면 거칠기는 공작물의 재질, 특히 절삭저항과 잘삭열(3) 그리고 절삭이 일어나는 가공구역에서는 구성인성의 영향, 발생된 칩에 의한 칩의 융착과 절삭보다는 소성변형(plastic deformation)에 의해 발생하는 요인으로 인해 이론적인 표면 거칠기와 실제 표면 거칠기와는 많은 차이를 발생하고 있다.

또한 공구부분에서는 발생 칩과의 친화력에 따른 유출 속도 및 칩의 발생 시 절삭부하로 인해 공구선단의 떨림, 기계의 강성, 날끝의 반경상태 등의 원인으로 이론적인 표면 거칠기와의 차이를 발생하고 있다. 표준속도로 가공하는 경우와 고속도로 가공하는 경우에서 표면 거칠기의 차이는 칩 배출능력을 결정하는 요소인자의 차이와 칩의 재 절삭으로 인해 발생하는 융착 및 발생 칩의 크기(volume) 증가로 인한 가공저항의 증가가 표면 거칠기의 차이를 발생하게 된다. 연질재료의 가공에 있어서 가공 정밀도에 영향을 미치는 이론적 표면 거칠기와 실제 가공에서의 실험조건 요인들이 작용된 표면 거칠기와의 차이를 분석하여 실험인자들에 따른 거동을 분석하고자 한다.

2-2. 이론적 표면 거칠기

엔드밀 공구의 1개의 날끝이 그 중심을 통과하는 수직 선상의 O점을 원점으로 가공물의 이송방향과 반대로 x축, 상향으로 y축을 잡았을 때 어떤 시간 t_0 (sec)후의 날끝의 좌표 $P(x,y)$ (Fig. 1참고)는 다음 식으로 표시된다.

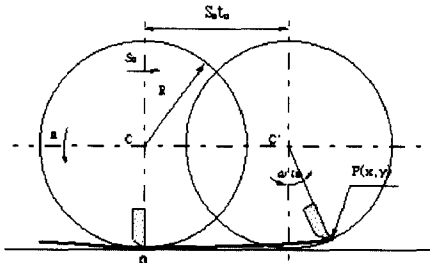


Fig.

1 Surface roughness model by cutter movement

$$x = S_0 t_0 + R \sin \omega t_0 \quad (1)$$

$$y = R(1 - \cos \omega t_0) \quad (2)$$

여기에서 이송거리를 날끝 1개에 대한 이송량 S_2 이라고 할 때 이론적인 평균 표면 거칠기 $H = y$ 는 수평방향의 이송량 S_2 의 1/2일 때, 즉 $y = S_2/2$ 에 대한 값이 된다. 그러므로 이론적 표면 거칠기의 값은 다음과 같다. (4)

$$H_{max} \approx \frac{S_2^2}{8R} \quad (3)$$

2-3. 공구선단의 영향

엔드밀을 칩에 칩킹을 하게 되면 Fig. 2와 같은 기하학적인 구조를 갖게 된다. 실제 가공 시 공구 선단 부분의 떨림(ΔL)은 공구의 도출길이(L)의 세제곱의 영향을 받으므로 가장 큰 영향을 받고 있다. 엔드밀 가공시 발생하는 절삭력(W)은 일반적으로 절삭칩의 부피에 비례하며 공구 선단 떨림에 직접적으로 관련된다.

떨림을 감소시키기 위한 요소로서는 단면 2차 모멘트양(I)과 엔드밀의 영률(E)이 큰 공구가 필요한데 이는 공구의 형상과 재질에 영향을 받고 있다.

공구의 날 수가 많아짐에 따라 공구의 중심 코아경은 커지며 상대적으로 단면2차 모멘트양은 증가되어 공구선단 떨림이 감소한다.

그러나 날수 증가에 따른 코아경의 증가는 칩포켓(chip pocket)의 감소로 칩 배출성에서 능력이 저하된다. 또한 공구선단부의 떨림은 가공정밀도의 손상과 표면 거칠기 저하의 원인이 된다.

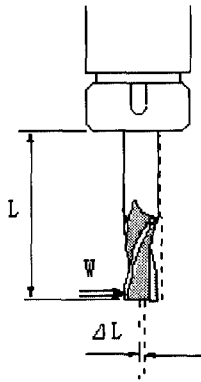


Fig. 2 Tool displacement factor

2-4. 칩(chip) 거동의 영향

절삭속도가 증가함에 따라 평균 절삭력이 줄어들고, 칩 배출이 원활하여 칩에 의한 재절삭 현상이 감소하게 된다. 절삭속도가 빨라짐에 따라 전단면에서의 모멘텀 에너지의 증가는 칩의 유출속도를 증가시키게 된다. 이러한 특성에 의해 칩이 멀리 유출되므로 칩에 의한 재절삭 현상과 구성인선의 방지효과가 나타나게 된다.⁽⁵⁾

구성인선의 발생과 성장에 대해서 고찰해 보면 구성인선의 발생은 공구에 피삭재가 응착하는 것이고, 구성인선의 성장은 응착물이 퇴적하는 것이다. 피삭재와 공구와의 친화성이 작을수록 표면 거칠기가 좋아지는 것은 구성인선의 영향이 적기 때문이다. 이는 소재와 공구와의 계면반응에서 절삭으로 인해 발생된 절삭열이 고온, 고압의 활성화된 분위기가 되면서 피삭재와 공구 사이에 응착반응을 일으키는 것이다. 저속절삭으로 인한 구성인선의 생성은 표면 거칠기를 저하하는 원인이 되며 이는 고속절삭이 되면서 차츰 감소한다. 이는 고속절삭의 특성인 계면반응 시간의 단축과 칩의 원활한 방출로 인한 공구날 주위의 절삭열 방출이 원만해지기 때문이다.

알루미늄 합금의 경우 칩의 형태가 일정한 곡률로 생성되기 때문에 절입량이나 날당 이송속도를 일정량 이상 증대함에 따라 구성인선의 양이 다소 증가되면서 표면 거칠기의 저하의 요인으로 나타난다. 따라서 최적의 절입량과 이송속도의 설정이 중요하다.⁽⁶⁾

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험장치

본 연구에서는 SAMSUNG LCV40 machining center를 사용하고 RANK TAYLOR (HOBSON) Form Talysurf를 이용하여 표면 거칠기를 측정하였다. 실험에서 사용된 절삭 공구 재료로는 고속도강(H.S.S), 초경합금, TiAlN 코팅 초경합금의 3종류이며, 직경이 10mm인 동일한 비틀림각(helix angle: 30°)을 갖고 있는 2날용 볼엔드밀(ball endmill)이고 절삭속도는 100~300m/min, 이송속도는 0.05~0.25mm/tooth로 하여 시험편을 가공하였다.

3-2. 실험방법

본 실험에 사용한 시험편은 알루미늄 합금중 최고의 강도를 갖고 있는 내식성이 탁월하고 금형, 지그 등에 많이 사용되고 있는 Al-7079를 사용하였다. 실험을 위하여 소재를 Fig. 3과 같은 40mm×40mm×140mm의 각재로 예비 가공한다. 절삭공구는 공구 선단의 동심도가 2 μ m이 내를 유지할 수 있도록 체결 접촉부위를 청결히 한 후 스프링 콜릿을 이용하여 삽입 후 공구의 도출 길이가 35mm를 유지하도록 체결시켜 주축에 물린 후 인디케이터로 동심도를 확인했다.

볼엔드밀로 가공하는 경사면은 가공여유가 균일한 살 두께를 유지할 수 있도록 완성 가공면을 기준으로 0.2mm의 살 두께로 예비 가공하여 두었다.

시험편 블록의 길이영역 140mm를 5개의 구간으로 나누어 정해진 절삭속도 내에서 이송속도를 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25mm/tooth씩 변화시켜 가면서 가공하고, 경사면의 경우 이송속도의 단위(mm/tooth)와 동일한 공구경로의 폭을 유지하도록 NC 프로그램을 구성하였다. 가공속도는 100, 150, 200, 250, 300m/min로 설정하였다.

표면 거칠기에 외부 요인이 되는 절삭액은 에멀전타입으로 10%의 농도액을 노즐 분사하였다. 또한 절삭실험을

실시한 시험편은 이물질 제거를 위해 알코올로 세척 후 경사면 측정은 V-block위에 놓고 공구경로 진행 방향과 피크피드 방향으로 surface roughness tester의 측정장비를 이용하여 측정값을 얻어내었다.

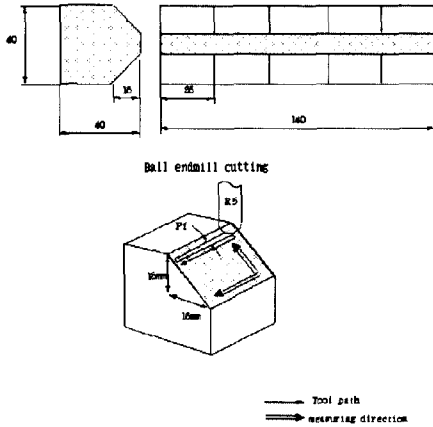


Fig. 3 Specimen dimension and cutting profile

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 설정된 가공조건에 의해 가공된 시험편을 surface roughness tester로 가공편의 표면 거칠기를 측정하여 그 값을 Fig. 4 ~ Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 고속도강 볼엔드밀로 가공한 결과를 절삭속도별로 나타내었다. H.S.S. 볼엔드밀로 경사면 가공은 가공여유 0.2mm정도의 두께를 가공하는 경절삭가공이다. 따라서 공구선단 끝에 작용하는 절삭부하가 비교적 적어 공구의 휨이나 떨림에 의한 가공 표면 거칠기의 악영향보다도 가공칩의 원활한 배출요소가 더 큰 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 고속도강 볼엔드밀은 2날로 칩포켓이 크고 칩을 생성하는 날 부위의 절삭속도가 빨라짐에 따라 칩의 유출이 원활해진다. 이는 고속이송 및 고속절삭에 의한 전단각의 증가현상과 모멘텀 에너지의 증가로 칩이 멀리 유출되므로 칩에 의한 재절삭 현상과 구성인선의 방지효과가 나타나 표면 거칠기의 향상의 원인으로 작용되는 것을 실험결과에서 보여주고 있다.

표면 거칠기를 결정하는 요인 중 연질재료와의 칩의 운활성이 좋은 고속도강 공구에서 표면 거칠기의 추이를 보면 이송량이 증가함에 따라 250m/min~300m/min의

고속절삭 가공영역에서는 가공 표면 거칠기가 전반적으로 2 μ m이하의 표면 거칠기를 나타내었다.

Fig. 5는 초경합금 볼엔드밀로 가공한 결과를 절삭가공속도별로 나타내었다. 초경합금 볼엔드밀은 공구의 강성이 양호하며 절삭속도에 따른 이송량증가에 대해서도 고속도강 볼엔드밀에 비해 공구선단부위의 떨림을 상쇄할 수 있는 능력이 탁월하였다. 이송량이나 피크피드의 증가에 따라 증가되는 표면 거칠기의 값이 모든 절삭속도에서 균일한 증가추세를 나타내었다. 이는 경절삭에서 절삭속도의 증가에 따른 칩 배출 유동성에 있어서 초경이라는 조직 특성상 알루미늄과의 응착성등의 표면친화성 때문에

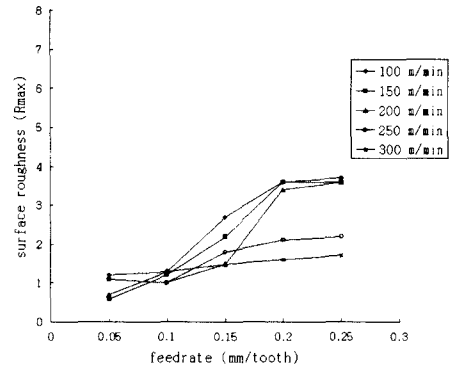


Fig. 4 Variation of surface roughness based on the cutting speed and the feedrate by a H.S.S. ball-end mill

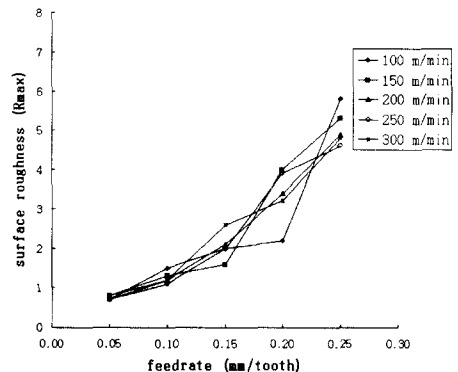


Fig. 5 Variation of surface roughness based on the cutting speed and the feedrate by a carbide ball-end mill

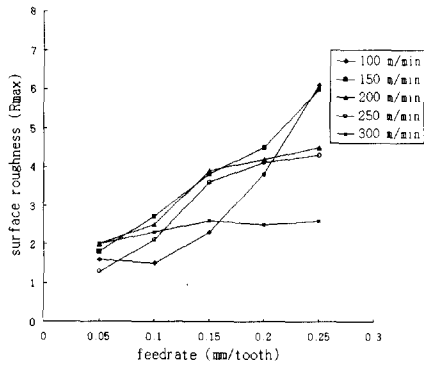


Fig. 6 Variation of surface roughness based on the cutting speed and the feedrate by a TiAlN coated carbide ball-end mill

칩의 거동에 있어서 구성인선의 발생 등이 표면 거칠기를 증가시키는 원인으로 작용한다.

구성인선의 특성은 공구의 날끝 부위에서 칩의 용착물의 성장으로 인한 퇴적물이 발생하는 것인데 이는 날당 이송량 증대에 따라 구성인선의 크기도 커지면서 그로 인한 가공표면 거칠기가 증대되는 것으로 나타났다.

Fig. 6는 TiAlN 코팅초경 볼엔드밀로 가공한 결과를 절삭속도별로 나타내었다. 전반적으로는 초경 볼엔드밀과 동일한 거동을 보이고 있으며 코팅층리에 따른 인선 부의 내마모성 향상은 가장 고속가공인 300m/min의 절삭속도에서 안정적인 표면 거칠기 2.5 μ m이하의 수평적인 값을 보여주고 있다.

이송량이나 피크피드의 증가에 따라 가공면의 표면 거칠기는 다소 증가하나 주축의 회전수를 결정하는 절삭속도의 증가는 오히려 고속가공의 영역이 될수록 양호한 표면 거칠기를 보이고 있는데 이는 절삭속도 증가에 따른 모멘텀 에너지의 증가가 칩 발생시 구성인선의 생성을 억제하는 현상으로 나타나기 때문이다.

Fig. 7 ~ Fig. 9는 피크피드방향으로 표면 거칠기를 측정했을 때의 거칠기 변화의 결과이다. 날당 이송량과 피크피드량이 동일한 조건일 때 중첩원리에 의거 곡면의 표면 거칠기를 향상시키며 이는 가공정밀도의 향상과 완성 가공이라는 결과를 달성할 수 있다. 피크피드량의 증가에 따른 가공표면 거칠기의 증가추세는 이론적 표면 거칠기 원리와 동일한 추세를 보였다. 날당 이송량과 피크피드량이 동일한 가공조건하에서 양방향의 표면 거칠기의 거동

은 날당 이송량이 적을 때보다 날당 이송량이 커지면서 상대적으로 동일한 표면 거칠기 값을 나타내는 추세를 보였다. 이는 일정한 임계값 이상의 이송량의 가공조건이 size effect에 의해 발생하는 러빙가공면을 감소시키는 요인으로 나타나고 있다.

본 실험 결과에서 절입량이 적은 경절삭가공면에서는 절삭 속도가 100~150 mm/min일 때는 초경합금 공구를 사용한 경우가 표면 거칠기가 다소 낮게 나타났지만 절삭 속도가 200~300m/min인 고속 가공 영역에서는 고속도강 공구를 사용한 경우가 가장 좋은 결과를 나타내고 있다.

절삭 속도가 빨라지게 됨에 따라 날수가 적고 이송량이 큰 커브의 침점들이 이론적 표면 거칠기의 지수 함수적 증가추세와는 다르게 아래쪽으로 기울어지는 경향을 알 수 있다. 즉, 고속가공의 장점을 충분히 활용하려면 가공재와 칩의 배출을 원활히 할 수 있는 공구형상과 원활한 칩의 배출로 이상적인 절삭 메커니즘을 활성화하는 가공방식이 표면 거칠기에 중요한 요인으로 작용하는 것을 알 수 있다. 특히 연질재료의 가공에 있어서 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 미치는 것은 구성인선의 생성을 억제하는 효과가 좋은 공구의 소재로는 고속도강 공구 강이 가장 우수하게 나타나고 있다.

고속가공에서는 동적 균형을 증시하기 때문에 가능한 공구의 도출길이를 짧게 하여 가공하는 것이 공구선단부의 떨림을 억제시켜 가공면을 좋게 할 뿐 아니라 공구마모를 유발하는 칩핑의 성장을 억제한다. 따라서 일반적으로 공구직경의 3~5배까지의 공구 도출길이의 가공이 안정된 고속가공영역으로 알려져 있다. 본 실험의 가공조건에서도 3.5배의 공구 도출길이를 사용하였다.

이론적 표면 거칠기의 계산식의 원리에서처럼 날당 이송량을 증가시키기에 따라 표면 거칠기는 증가되는 추세를 나타내고 있지만 증가되는 기울기는 고속가공이 될수록 안정된 기울기를 나타내고 있다. 일반적인 머시닝센터의 가공영역에서 기계 성능을 최대한 사용한 조건인 절삭속도 300m/min, 날당 이송량 0.25mm일 때 사용한 가공조건은 주축속도 9554 rev/min와 이송속도 4.8m/min의 가공조건이었다. 이 때 얻을 수 있는 가장 우수한 가공면의 거칠기는 고속도강 공구로 1.7 H_{max} 로 나타나고 있다.

반면 실험조건상 절삭속도 100m/min, 날당 이송량 0.05mm일 때 사용한 가공조건은 주축속도 3184 rev/min 와 이송속도 0.32m/min의 가공조건이었다.

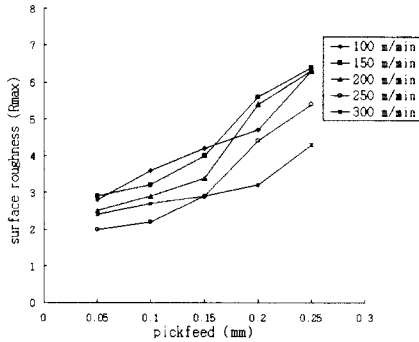


Fig. 7 Variation of surface roughness based on the cutting speed and the pickfeed by a H.S.S. ball-end mill

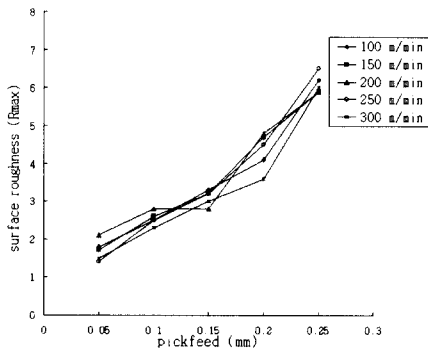


Fig. 8 Variation of surface roughness based on the cutting speed and the pickfeed by a carbide ball-end mill

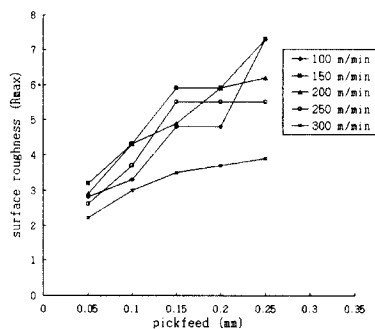


Fig. 9 Variation of surface roughness based on the cutting speed and the pickfeed by a TiAlN coated carbide ball-end mill

이때 얻을 수 있는 가장 우수한 가공면의 거칠기는 초경공구로 $0.7 H_{max}$ 로 나타나고 있다. 단위시간당 가공면적을 볼 때 $1194.25\text{mm}^2/\text{min}$ 와 $15.92\text{mm}^2/\text{min}$ 로 가공능률에서 75배의 차이를 나타내고 있다.

따라서 본 실험을 통해 연질금속인 Al-7079소재의 가공에 있어서 일반적 머시닝센터의 기계성능 범위에서 사용자가 얻고자하는 표면 거칠기에 대한 최적조건의 설정 기준을 제시하였다.

5. 결론

연질재료의 볼엔드밀에 의한 경사면 가공에서 절삭속도와 이송속도 변화의 실험을 통한 가공조건의 최적화 방안에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 100~150m/min 절삭속도에서는 초경공구가 표면 거칠기 값이 좋게 나타나지만 200~300m/min의 고속 가공영역에서는 고속도강 공구가 가장 좋은 결과를 보이고 있다. 연질재료의 가공에서 표면 거칠기의 형성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 구성인선의 생성을 억제하는 효과가 가장 좋은 공구의 소재로는 고속도강 공구이다.
2. 경질삭(가공여유 0.2mm) 볼엔드밀 가공에서 절삭속도가 고속화됨에 따라 칩 유출 모멘텀의 증가로 칩 유출이 양호하기 때문에 칩에 의한 재절삭 원인의 감소로 이송속도를 증가하여도 미려한 가공면을 얻을 수 있었다. 칩의 크기가 적은 연질금속의 고속가공을 위해서는 칩의 배출성의 개선이 중요하며 절삭속도의 증가에 따른 최적의 날 당 이송량도 증가하였다.
3. 연질재료에서는 이송속도(mm/tooth)의 설정을 어느 범위 이하로 미세화 시키게 되면 이송에 따른 생성칩의 두께가 너무 얇아져 Size Effect 효과로 오히려 표면 거칠기의 향상은 없고 버니싱 현상에 의한 러빙면 가공 부위가 발생된다. 절삭에 의한 가공보다는 소성변형에 의한 국부적인 변위가 발생되므로 이론적인 거칠기와는 더 큰 차이를 보였다.
4. 이론적 표면 거칠기의 계산식에서 날당 이송량을 증가 시킴에 따라 표면 거칠기는 증가되는 추세를 나타내고 있지만 증가되는 기울기는 고속가공이 될수록 안정된 기울기를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Hornjak, "High Speed Cutting of Flat Die Areas in the Tool, Die and Mould Industry", ISTA Conference Reports, Germany, pp. 5-29, 1995.
2. 홍민성, "수치해석법에 의한 면삭밀링 작업에서의 절삭력과 표면 거칠기에 관한 연구", 한국공작기계기술학회지, 제4권, 제4호, pp. 16-24, 1995.
3. 윤종학, 이종원, 정기영, 정문섭, "머시닝센터에서 볼엔드밀가공으로 고능률, 고정밀도 제고를 위한 표면가공 조건", 한국공작기계학회지, 제7권, 제3호, pp. 99-103, 1998.
4. 염영하, 공작기계의 절삭이론, 동명사, pp. 303-330, 1985.
5. 양민양, "고속가공" CAD/CAM컨소시엄활동보고서, pp. 4-60, 1995.
6. 大類恒太, "金型用AL合金の高速仕上加工の實驗" 型技術 7, pp. 40-41, 1995.