

볼엔드밀의 고속가공에서 절삭력 분석 및 평가에 관한 연구

이춘만[#], 류승표^{*}, 고태조^{**}, 정종윤^{***}, 정원지^{****}

A study on the Analysis and Evaluation of Cutting forces for High Speed Machining by a Ball-end mill

Choon Man Lee[#], Seung Pyo Ryu^{*}, Tae Jo Ko^{**}, Jong Yun Jung^{***}, Won Jee Chung^{****}

ABSTRACT

High-speed machining is one of the most effective technologies to improve productivity. Because of the high speed and high feed rate, high-speed machining can give great advantages for the machining of dies and molds. This paper describes on the analysis and evaluation of cutting force in high-speed machining. Cutter rotation directions, slope directions, spindle revolution and depth of cut are control factors for cutting force. The effect of the control factors on cutting force is investigated for the high speed machining of STD11.

Key Words : High-speed machining (고속가공), Cutting force(절삭력), Up milling(상향절삭), Down milling(하향절삭), Up-ward cutting(상방향절삭), Down-ward cutting(하방향절삭) Surface roughness (표면거칠기), STD11

1. 서론

최근 산업현장에서는 생산성 향상과 품질향상을 위하여 고속화, 고정도화가 요구되는 고속가공(High-speed machining)^{1,2}이 이루어지고 있다. 이에, 각종 기계 구성 부품의 가공정밀도의 개선, 생산성의 개선은 가공경비를 감소시켜 경쟁력을 강화시킨다. 특히 최근 금형 가공에서 요구되는 납기단축과 제조경비절감(Cost down)에 따른 생산성 향상이 이루어지고 있다. 고속가공에서는 주축회전수(rpm)를

증가시킴으로써 높은 절삭속도(Cutting speed)를 얻을 수 있고, 절삭속도의 증가에 따라 기존의 이송속도(Feed rate)보다 훨씬 빠른 이송속도로 절삭이 가능하다. 이런 빠른 이송속도에 의한 가공시간의 대폭적인 감소가 고속가공의 큰 이점이다. 그러나 고속가공에 있어 공작기계의 강성과 구조, 공구의 형상, 가공기술, 가공조건 등에 의해 고속가공은 많은 영향을 받게 된다. 또한, 최근 신소재의 개발에 따른 금형 재료의 고경도화, 난삭화에 따른 고속가공 기술개발이 더욱 대두되고 있다. 이에, 보다 나은

접수일: 2004년 3월 3일; 게재승인일: 2005년 3월 11일

교신저자: 창원대학교 기계설계공학과

E-mail cmlee@sarim.changwon.ac.kr, Tel : (055) 279-7572

* 창원대학교 대학원 기계설계공학과

** 영남대학교 기계공학부

*** 창원대학교 산업시스템공학과

**** 창원대학교 기계설계공학과

고속가공을 실현시키기 위해 국내·외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 국내에서 진행된 고속가공에 대한 연구들은 대부분 외국에서 생산된 고속가공기를 사용한 연구 결과들이고, 실제로 현장에 적용하기는 어려운 점들이 많다.

따라서 본 논문의 목적은, 국내에서 개발된 고속가공기를 이용하여 엔드밀링을 이용한 절삭력 모델링을 통해 가공조건과 가공 경사각에 따른 절삭력 분석을 통하여 고속가공에 있어서 형상정밀도를 높일 수 있는 추천 가공조건 및 가공경사각을 제시해 주고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 고속가공기는 수직형머시닝센터로 최대 주축회전수 35,000rpm, 최대 급속·절삭 이송속도 40m/min 이다. 사용된 공구는 고속가공 전용 공구로 날수가 2개인 고속가공용 ϕ 6-볼엔드밀(SANDVIK)이고, 시편재질은 일반 금형업체에서 많이 사용되는 냉간 공구강인 STD11(HrC45)을 사용하였다. 본 실험에 사용된 장비 및 절삭조건은 Table 1과 같다.

수직형머시닝센터에서 볼엔드밀로 가공 시 최적의 경사각을 10° ~ 20° 로 선정함으로써 고속가공시 절삭의 최적화를 이룰 수 있다고 보고되고 있다.^{3,4} 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시편 형상을 평면구간(0°)과 상방향 경사구간(15° , 30° , 45°), 하방향 경사구간(15° , 30° , 45°)의 7개 구간으로 선정하여 경사각에 따른 절삭력 특성을 살펴보았다. 시편의 형상은 총 7개구간으로 나뉜다. 즉, 평면구간과 공구가 경사면을 올라가면서 절삭하는 상방향절삭(Upward cutting) 구간과 공구가 경사면을 내려가면서 가공하는 하방향절삭(Downward cutting) 절삭구간으로 나뉜다. 이는 공구에 작용하는 절삭영역이 같은 경사각도일지라도 공구경로에 따라 절삭부위가 다르게 나타나므로 절삭력의 크기와 절삭 특성 역시 다르게 나타나기 때문에 각각의 경사각도에 따른 절삭력분석과 절삭방향에 따른 절삭력 분석을 실시하기 위해서이다.

또한, Fig. 2에서처럼 공구와 피삭재의 절삭방향에 따른 상향절삭(Up milling)과 하향절삭(Down milling)에 대한 비교 분석과 절삭깊이 변화에 따른 절삭력을 분석하였다.

본 연구의 실험에서 사용된 공구동력계는 약

4kHz의 주파수를 측정할 수 있는 KISTLER 9256A를 사용하였고, 증폭기는 KISTLER 5019A를 사용하였다. Fig. 3은 절삭력 실험에 대한 시편 및 공구동력계의 개략도를 보여주고 있다. Fig.3의 그림에서 $-F_x$ 방향으로의 가공이 하향절삭이고 $+F_x$ 방향으로의 가공이 상향절삭이다.

Table 1 Specification of Experimental Equipment and Cutting Condition

Machine Tool	Vertical Machining Centers (FV400, DAEWOO Heavy Industries & Machinery Ltd)
Spindle Speed(rpm)	8000, 10000, 12000
Feed per tooth (mm/tooth)	0.1
Depth of Cut(mm)	0.1, 0.15
Pick-Feed(mm)	0.2
Cusp Height(mm)	0.001
Tool	HSM 2 Ball Endmill Diameter : ϕ 6
Workpiece	STD11(HrC45)



Fig. 1 Modeling of sample

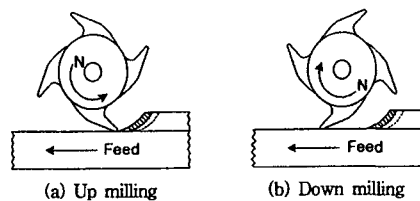


Fig. 2 Comparison of cutting direction

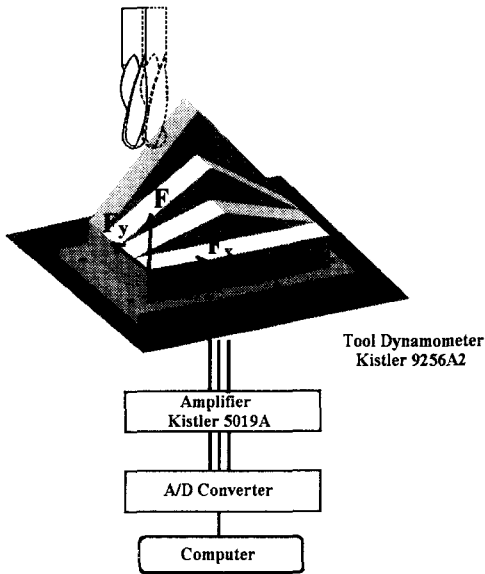


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

3. 실험결과 및 분석

3.1 하향절삭 가공 시 절삭력 분석

하향절삭 가공에 따른 절삭력 분석 가공실험에서는 날당이송량 0.1mm/tooth에 대한 주축회전수 변화에 따른 절삭력 분석을 실시 하였다. 절삭깊이는 0.1mm로 하였으며 주축회전수는 8000, 10000, 12000RPM으로 정하였다. 피크피드량은 0.2mm이다. Fig. 4는 각 경사구간과 절삭방향에 따른 절삭영역을 나타내고 있다. 같은 경사각도 일지라도 가공 방향에 따라 절삭영역은 다르게 나타난다. Fig. 4의 (b)와 (c)를 보면 같은 15°경사구간 가공이지만 하방향 절삭인 경우에는 평면구간에서처럼 공구의 끝단에서 절삭이 이루어짐을 확인할 수 있다. 이는 15°경사구간에선 하방향보다 상방향으로 가공하는 것이 표면품질나 절삭력에 있어서 시편과 공구에 좋은 영향을 미치는 것을 의미한다. 공구의 회전에 따른 절삭력을 보여주는 Fig. 5의 (b)와 (c)에서처럼 같은 경사구간이지만 절삭력의 크기와 절삭 특성은 전혀 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

각 경사구간의 x방향의 힘과 y방향의 힘은 공구

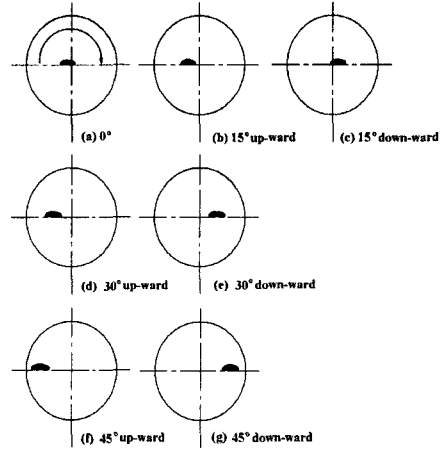


Fig. 4 Cutter contact area (down milling)

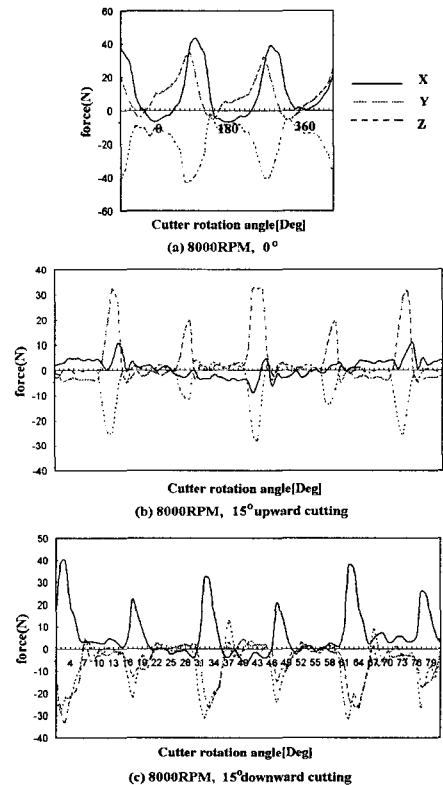


Fig. 5 Cutting force according to cutter rotation angle and cutting condition

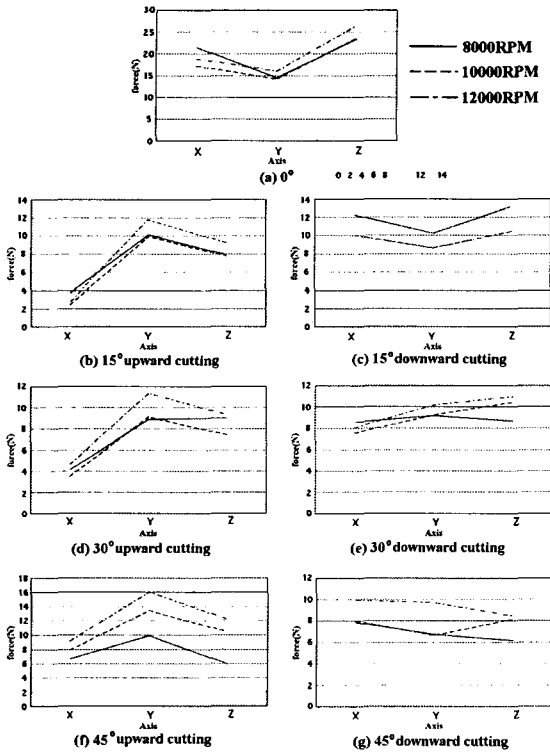


Fig. 6 RMS cutting forces according to cutting condition

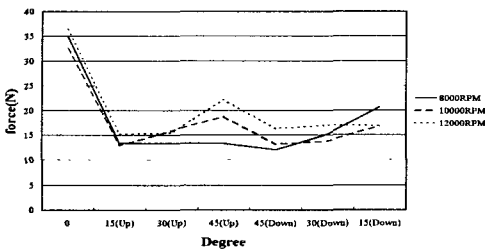


Fig. 7 Cutting forces according to cutting condition and slope direction (Total force)

회전방향과 절삭영역에 따라 그 부호가 결정된다. 즉, Fig. 4의 (a), (b), (d), (f)에서처럼 절삭이 주로 2사분면에서 이루어 질 때 공구 회전방향에 따른 접선벡터를 생각해 보면 y축 방향의 힘은 ‘+’로 작용함을 알 수 있고 반대로 Fig. 4의 (c), (e), (g)의 경우처럼 1사분면에서 절삭이 이루어 질 때에는 y

축 방향의 힘이 ‘-’ 방향으로 작용함을 알 수 있다. Fig. 6은 각 경사구간에 따른 RMS cutting forces를 나타내고 있다. 공구의 끝단에서 절삭이 이루어지는 평면구간과 15°하방향 경사구간에선 다른 경사구간에 비해 보다 큰 절삭력이 측정되었다. 또한 하방향에 비해 상방향 경사구간에선 y축 방향의 힘이 가장 크게 나왔는데 이는 하향절삭의 상향절삭에선 절삭영역이 공구 진행방향의 앞쪽부분에서 절삭이 이루어 졌기 때문이다. 즉, 공구의 형상이 불이므로 처음 깎는 모양의 칩 형상이 뒤쪽부분에 비해 두껍기 때문에 y축 방향의 힘이 가장 크게 나왔다.

평면구간과 각 경사구간의 상방향, 하방향에 따른 합력(total force)은 Fig. 7에 나타나 있다. 그래프에 나타나듯이 일반가공에 비해서 높은 절삭속도로 가공하는 고속가공에서는 낮은 절삭력으로 인해 공구변형과 공작물의 표면에 좋은 영향을 미칠 것으로 보인다. 그러나 고속가공에서도 공구의 중심에서 절삭이 이루어 지는 평면구간과 하방향 15°경사구간에서는 다른 구간에 비해 큰 절삭력이 나왔다. 이는 표면품위를 중요시 하는 금형가공에 있어서 평면가공과 하방향 15°경사구간의 가공 시 다른 경사구간에 비해 큰 잔류응력이 남기 때문에 좋지 않은 표면품위를 가져올 것으로 보인다. 또한 높은 경사구간일수록 주축회전수의 증가에 따라 절삭력 또한 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 유효공구직경이 큰 높은 경사각도에서는 주축회전수 증가가 절삭력에 좋지 않은 영향을 미친다는 것을 의미한다. 즉, 날당이송량과 주축회전수의 적절한 가공 조건에서 가공할 때 최적의 절삭력과 표면품위를 가져올 것으로 보인다.

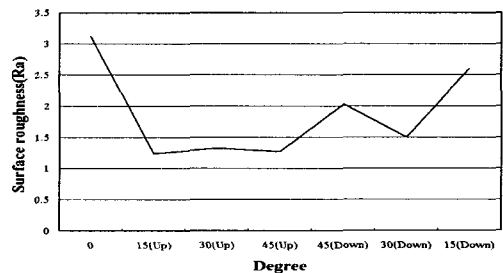


Fig. 8 Surface roughness according to cutting condition and slope direction (12000RPM)

Fig. 8은 날당이송량 0.1mm/tooth에 대한 주축회전수 12000RPM일 때의 표면 거칠기를 나타내고 있다. 같은 가공조건일 때의 절삭력과 비교해 보았을 때 유사함을 확인 할 수 있다. 즉, 절삭력과 표면거칠기는 깊은 상관 관계가 있으며 절삭력이 적게 걸리는 가공 조건과 가공 경사각도를 찾으면 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있을 것이다.

3.2 상향절삭 가공 시 절삭력 분석

상향절삭 가공에 따른 절삭력 분석 가공실험에서는 날당이송량 0.1mm/tooth에 대한 주축회전수 8000RPM이다. 절삭깊이는 0.1mm로 하였으며, 피크피드량은 0.2mm이다. 하향절삭과 마찬가지로 경사각도에 따른 상방향과 하방향의 절삭력에 따른 영향을 분석하였다.

Fig. 9는 각 경사구간과 절삭방향에 따른 절삭영역을 나타내고 있다. 하향절삭과 마찬가지로 상향절삭에서도 같은 경사각도 일지라도 가공 방향에 따라 절삭영역은 다르게 나타난다.

일반적인 금형가공에서는 상향 보다는 하향절삭이 주로 이루어진다. 그 이유는 상향의 경우는 경사각도에 따라 약간의 차이가 있겠지만 공구날이 피삭재를 뜯어내는 방향으로 가공하기 때문에 금형에 좋지 않은 결과를 초래할 수 있기 때문이다.

하향절삭의 각 경사구간에서 같은 경사각도일지라도 상방향과 하방향 절삭에 따라 공구의 절삭

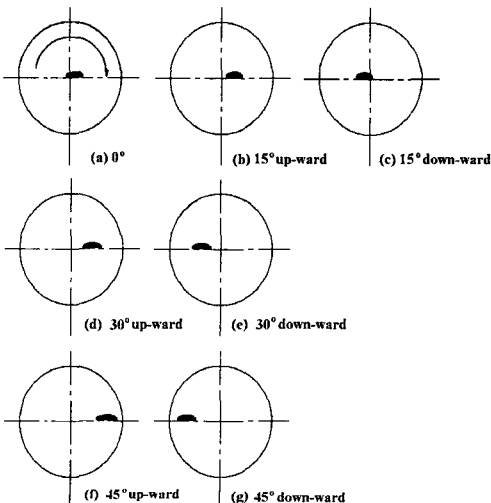


Fig. 9 Cutter contact area (up milling)

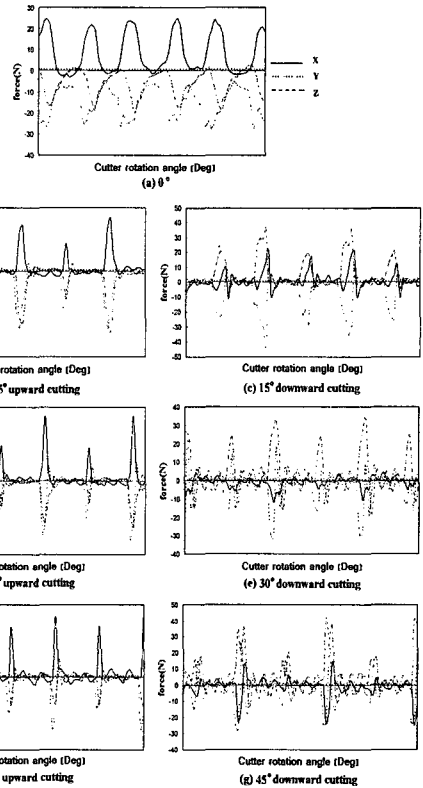


Fig. 10 Cutting force according to cutter rotation angle and cutting condition

영역이 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 상향절삭에서도 Fig. 9에서처럼 각 경사구간에 따라 절삭영역이 다를 수 있다. 이는 절삭력의 크기나 절삭특성 역시 다르게 나타난다는 것을 의미한다. 특히, 상향절삭에서도 하향절삭에서처럼 하방향 15° 경사구간에선 공구의 끝단에서 절삭이 이루어진다. 반면에 상방향 15° 경사구간에선 공구 중심에서 약간 벗어난 지점에 절삭이 이루어 지므로 같은 경사각도 하방향에 비해 절삭력뿐만 아니라 피삭재의 표면품위에도 상방향 절삭이 양호한 결과가 나올것으로 기대된다. Fig. 10 (d) ~ (g)에는 30° 경사구간과 45° 경사구간의 상방향과 하방향의 절삭력을 나타내고 있다. 역시 같은 경사각도일지라도 상방향과 하방향에 따라 절삭 특성이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 이는 공구의 진행방향 앞쪽에서 절삭이 일어나는 상방향 절삭과 공구의 뒤쪽에서 절삭이 이루어지는 하방향 절삭의 절삭 영

역이 다르므로 절삭특성이 다르게 나온것이다.

상향절삭과 하향절삭의 같은 가공조건하에서 비교한 힘력은 Fig. 11에 나와 있다. 상향절삭에서

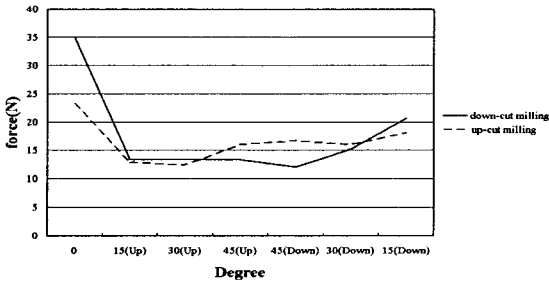


Fig. 11 Cutting force according to slope direction and cutter rotation direction (8000RPM, total force)

도 하향절삭에서처럼 공구의 끝단에서 절삭이 이루어지는 평면구간과 15° 하방향 경사구간이 다른 경사구간에 비해 큰 절삭력이 나타났다. 이는 금형과 같은 표면품위를 중요시하는 공작물을 깎을 때 평면구간과 낮은 경사각도의 하방향의 절삭은 좋지 않은 품위를 가져올 수 있다는 것을 의미한다. 상향절삭에도 하향절삭에서처럼 15°와 30° 상방향 절삭에서 다른 경사각도에 비해 가장 적은 절삭력이 나왔다.

3.3 절삭깊이 변화에 따른 절삭력 분석

실험은 주축회전수 4000RPM과 날당 이송량 0.1mm/tooth인 가공 조건에서 하향절삭으로 가공하였다. 가공면은 평면구간과 15° 경사구간의 상방향과 하방향 절삭가공으로 정하였다.

절삭깊이(depth of cut)는 0.1mm, 0.15mm로 선택하였으며 주파수 영역은 4kHz로 측정하였다. Fig. 12 (a) ~ (f)는 평면구간과 15°경사구간의 상방향과 하방향의 경사각도에서의 절삭력을 보여주고 있다. Fig. 12 (a)와 (b)는 평면구간에서 0.1mm와 0.15mm의 절삭깊이에서의 절삭력을 (c)와 (d)는 15°상방향 경사구간에서 0.1mm와 0.15mm의 절삭깊이에 따른 절삭력을 보여주고 있다. 그리고 (e)와 (f)는 15°하방향 경사구간에서의 절삭력을 보여주고 있다. 절삭깊이 0.05mm 증가에 따라 min 13%에서 max 28%의 절삭력이 증가하였다. Fig.

13 (a) ~ (c)는 평면구간과 15°상방향, 하방향의 RMS cutting force를 나타내고 있다. 절삭깊이 0.05mm 증가에 따른 절삭력 증가는 공구의 끝단에서 절삭이 이루어지는 평면구간과 15°하방향

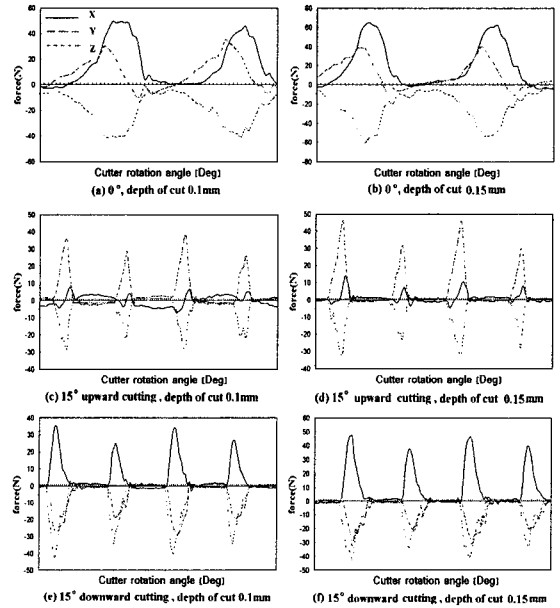


Fig. 12 Cutting force according to the depth of cut

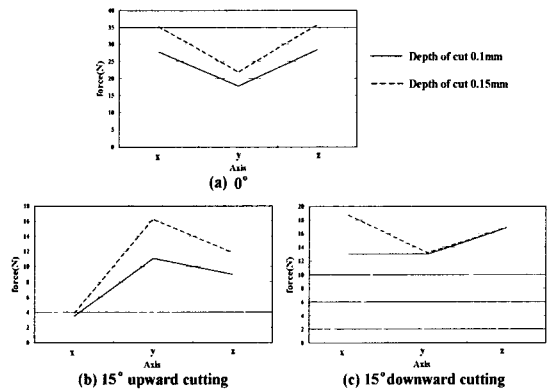


Fig. 13 RMS cutting force according to cutting conditions

경사구간의 절삭력 증가보다 15°상방향 경사구간에서 절삭력 증가가 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었다. 각 절삭구간의 합력은 Fig. 14에 그래프로 나타내었다. 그래프에서 나타나 있듯이 절삭깊이 0.15mm의 15°상방향의 경사구간에서 합력이 절삭깊이 0.1mm의 15°하방향의 경사구간의 합력보다 작게 나왔다. 이는 상방향 절삭시에는 절삭부위가 공구 바닥면의 바깥쪽에 분포하여 안쪽에 분포하는 하방향 절삭에 비해 절삭성이 향상되기 때문으로 사료된다.

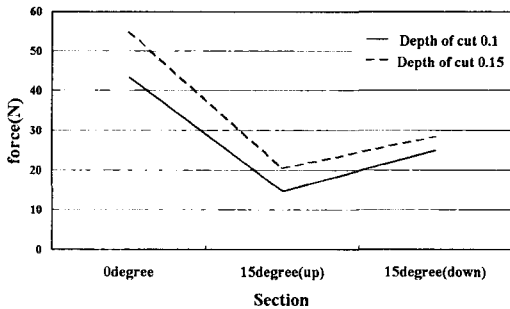


Fig. 14 Cutting force according to the cutting section

4. 결론

본 논문은 불엔드밀에 의한 고속가공 절삭실험을 통해 각각의 가공조건에 따른 절삭력 분석을 하였다. 절삭력은 하향절삭(down-cut milling) 시 날당이송량 0.1mm/tooth에 대한 주축회전수 변화를 주어 각각에 대한 절삭력을 분석하였고, 상향절삭(up-cut milling) 시 날당이송량 0.1mm/tooth에 대한 주축회전수 8000RPM에 대한 절삭력을 분석하였다. 절삭력 예측을 위해 날당이송량과 절삭깊이에 대한 많은 실험이 사료된다.

본 실험에서 수행한 가공조건 범위에 각 조건에 의한 절삭력에 대한 영향은 다음과 같다.

1. 평면구간과 각 구간의 경사구간 가공 시 공구의 절삭영역의 변화에 의한 절삭특성이 변화하는 것을 알 수 있었다. 특히, 공구 끝단에서 절삭이 이루어지는 평면구간(0°)과 하방향

- 15°경사구간에서 큰 절삭력이 측정되었다.
2. 본 논문에서 절삭력과 표면거칠기의 상관관계를 확인하였으며 절삭력이 작은 경사각도와 절삭조건에서 보다 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있음을 확인하였다.
3. 공구의 절삭영역과 칩의 형상과 관련하여 상방향(up-ward) 경사구간의 가공 시 y축 방향의 힘이 크게 나왔다. 즉, 칩의 형상이 처음 깎는 부분의 앞쪽 부분이 뒤쪽 부분에 비해 두껍기 때문이다. 또한 상방향 시 공구의 절삭영역에 의해 y축방향의 힘이 '+' 쪽으로 작용하며 하방향(down-ward) 시 y축방향의 힘이 '-' 쪽으로 작용함을 알 수 있었다.
4. 상향절삭에서도 하향절삭에서처럼 공구의 끝단에서 절삭이 이루어지는 평면구간(0°)과 하방향 15°경사구간이 다른 경사구간에 비해 큰 절삭력이 나타남을 알 수 있었다. 이는 상향절삭에서도 표면품위를 중요시 하는 금형가공에 있어서 큰 잔류응력이 남기 때문에 좋지 않은 표면품위를 가져온다.
5. 하향절삭과 상향절삭의 두 경우 모두 상방향 15°경사구간과 30°경사구간에서 가장 낮은 절삭력을 나타내었다.
6. 절삭깊이의 변화는 0.1mm와 0.15mm에 대한 분석을 실시하였다. 절삭깊이 0.05mm 증가에 따라 max 28%에서 min13%로 절삭력이 증가하였다. 가장 큰 절삭력의 변화를 보인 구간은 공구끝단에서 이루어지는 평면구간과 하방향 15°경사구간에서 절삭력 증가가 두드러지게 나타났다. 또한 절삭깊이 0.15mm의 상방향 15° 경사구간에서 합력이 절삭깊이 0.1mm의 하방향 15°경사구간의 합력보다 작게 나왔다. 이는 고속가공에서의 절삭력에는 절삭깊이 뿐만 아니라 경사각도와 절삭방향 역시 영향을 미치는 것을 의미한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 (주)대우종합기계의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. King, R. I., Vaughn, R. L., "A Synoptic view of High-Speed Machining From Salomon to the Present," Ann. ASME, pp. 1-13, Dec. 1984.
2. Tlusty, J., "High speed milling," Proceedings of the 6th Int. machine tool engineers conference(IMEC), pp. 35-60, 1994.
3. Lee, J. C., "High Speed Machining," The Korean Society of Machine Tool Engineers, Spring Conference, pp 8-10, 1998.
4. Ko, T. J., Jeong, H., Kim, H. S., "Selection of Machining Inclination Angle of Tool Considering Tool Wear in High Speed Ball End Milling," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 135-144, 1998.
5. Kahles, J. F., Field, M. and Harvey, S. M., "High Speed Machining Possibilities and Need," CIRP, Vol. 27/2, pp. 551-560, 1978.
6. Lee, C. M., Kweon, B. D., Ko, T. J, Jung, J. Y., Chung, W. J., "A Study on the Improvement of Machining Accuracy in High Speed Machining using Design of Experiments," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 88-96, 2002.
7. Schulz, H., Hock, St., "High-speed Milling of Dies and Molds - Cutting Conditions and Technology," Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 35-38, 1995.
8. Choi, B. K., Robert, B. J., "Sculptured Surface Machining," KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, pp. 242-247, 1998.
9. Hahn, D. W., Ko, S. L., Lee, K. W., "Determination of Optimal Cutting Conditions Based on the Relationship between Tool Grade and Workpiece Material," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 79-89, 1998.
10. Park, H. Y., Ko, H. J., Jung, Y. G., "A Study on Processing Technology of High-Speed and High-Accuracy for Metal Mold Cuttin," Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp. 221-226, 1999.
11. Kahng, C. H., "Machine Tool Technology : The Present and The Future (3)," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 5-12, 1995.
12. Son, C. S., Kang, M. C., Kim, J. S., Lee, D. W., Hwang, K. H., Kim, J. K., "High Speed Machining of Difficult-to-cut Material using Ball Endmill," Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp. 139-142, 1997.