

STD11 금형강의 고속가공에서 가공정밀도 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Machining Accuracy in High Speed Machining of STD11

이춘만(창원대학교 기계설계공학과), 최치혁*(창원대학교 대학원), 정원지(창원대학교 기계설계공학과)
정종윤(창원대학교 산업시스템공학과), 고태조(영남대학교 기계공학부), 김태형(대우중합기계)

C. M. Lee(Changwon National Univ.), C. H. Choi*(Graduate School Changwon National Univ.), W. J. Chung(Changwon National Univ.)
J. Y. Jung(Changwon National Univ.), T. J. Ko(Yeungnam Univ.), T. H. Kim(Daewoo Heavy Industries & Machinery Ltd)

ABSTRACT

High-speed machining is one of the most effective technology 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 improvement of machining accuracy in high-speed machining. Depth of cut, feed rate, spindle revolution and cutting force are control factors. The effect of the control factors on machining accuracy is discussed for the results of surface roughness and machining error in Z-direction for the high speed machining of STD11.

Key Words : High-speed Machining, STD11, Surface Roughness, Machining Error in Z-direction, Cutting Force

1. 서론

최근 산업현장에서는 생산성 향상과 품질향상을 위하여 고속화, 고정도화가 요구되는 고속가공(High-Speed Machining)이^(1,2) 이루어지고 있다. 따라서, 각종 기계 구성 부품의 가공정밀도의 개선, 생산성의 개선은 가공경비를 감소시켜 경쟁력을 강화시킨다. 특히 최근 금형 가공에서 요구되는 납기 단축과 제조경비절감에 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.⁽³⁾ 또한, 최근 신소재의 개발에 따른 금형 재료의 고정도화, 난삭화에 따른 고속가공 기술개발이 더욱 대두되고 있다. 이에, 보다 나은 고속가공을 실현시키기 위해 국내·외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 국내에서 진행된 고속가공에 대한 연구들은 대부분 외국에서 생산된 고속가공기를 사용한 연구 결과들이고, 실제 생산현장에 적용하기는 어려운 점들이 많다.

따라서 본 논문의 목적은, 국내에서 개발된 고속가공기를 이용하여 가공조건에 따른 고속가공기의 특성을 파악하고 고속가공기의 성능을 평가하는데 있다. 또한 일반 금형업체에서 많이 사용되고 있는 STD11(HRc45)을 가공하여 고속가공기를 이용한 자유곡면가공을 많이 하는 금형업체에서 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 고속가공기는 수직형머서닝센터로 최대 주축회전수 20,000rpm., 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.

Table 1 The Specification of Experimental Equipment and Cutting Condition

Machine Tool	Vertical Machining Centers (ACE-M500, DAEWOO Heavy Industries & Machinery Ltd)
Spindle Speed(rpm)	10000, 12000, 14000
Feedrate(mm/min)	3200, 6400, 9600
Depth of Cut(mm)	0.1, 0.15, 0.2
Pick-Feed(mm)	0.15
Cusp Height(mm)	0.001
Tool	HSM 2 Ball Endmill Diameter : ϕ 6
Workpiece	STD11(HRc45)

수직형머시닝센터에서 볼엔드밀로 가공시 최적의 경사각을 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 로 설정함으로써 고속가공시 절삭의 최적화를 이룰 수 있다고 보고되고 있다.⁽⁴⁾ 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시편 형상의 직선 경사부분을 45° , 30° , 15° 로 설정하여 경사각에 따른 가공 특성을 살펴보았다. 그리고 공구가 경사면을 올라가면서 절삭하는 상방향절삭(Upward cutting)과 공구가 경사면을 내려가면서 절삭하는 하방향절삭(Downward cutting)시 공구에 작용하는 절삭부위는 같은 경사각도를 가지는 시편이라 할지라도 공구경로에 따라 절삭부위가 다르게 나타난다. 이에 본 논문에서는 상방향절삭과 하방향절삭의 가공특성을 파악할수 있게 Fig. 1과 같이 좌우 대칭인 형상으로 시편을 결정하였다.

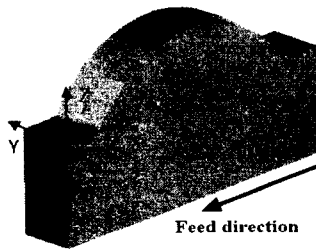


Fig. 1 Modeling of sample

본 연구의 실험은 실험계획법을 적용하여 실험을 실시하고, 측정된 데이터를 분산분석(Analysis of variance)을 통해 분석하였다. 본 논문의 실험에서 이송속도, 절삭깊이, 주축회전수를 제어인자로 하였는데, 이는 표면거칠기와 가공오차에 가장 큰 영

향을 주는 인자이기 때문이다. 본 연구에서는 2가지의 실험을 실시하였는데, 첫 번째는 절삭깊이와 이송속도를 제어인자로 하였고, 두 번째는 주축회전수와 이송속도를 제어인자로 하였다. 각 실험에서 인자의 수준은 Table 2 ~ Table 3과 같이 결정하였다. 이 수준은 현장에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 값이며, 가공순서는 난수표를 사용하여 완전 랜덤화 하여 실시하였다.

실험순서에 따라 3시편당 1개의 공구를 사용하였다. 이는, 현장 경험에 의한 최적의 공구 교체시기를 고려하였다. 따라서, 본 연구에서는 공구마모를 무시하였다.

Table 2 Factors and levels for first experimental machining according to depth of cut and feed rate (RPM : 14000rpm)

Factor			Level		
Sign	Factor	Unit	1	2	3
A	Depth of cu	mm	0.1	0.15	0.2
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600

Table 3 Factors and levels for second experimental machining according to feed rate and spindle RPM (Depth of cut : 0.1mm)

Factor			Level		
Sign	Factor	Unit	1	2	3
A	RPM	rpm	10000	12000	14000
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600

앞에서 언급한 각 조건에서 절삭한 시편을 3차원 측정기(PRISMO 7, ZEISS)를 이용하여 가공 오차를 측정하였고, 가공표면을 표면조도기(Surfest SV-600, Mitutoyo)를 이용하여 중심선평균표면거칠기(Ra)로 피크피드(pick feed) 방향에서 측정하였다.

또한, Fig 1의 시편에 대해 공구동력계(KISTLER 9256A)를 사용하여 절삭력을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 절삭깊이와 이송속도를 고려한 가공실험
 절삭깊이와 이송속도를 고려한 가공실험에서 반복이 없는 이원배치법을 적용하여 실험을 실시하였다. 그리고 분산분석을 이용하여 절삭깊이와

이송속도가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 가공시편의 직선부분과 곡선부분의 Z축 가공오차 측정결과를 그래프로 나타내었다. 측정포인트는 직선부분의 직선구간은 2포인트, 경사구간은 3포인트를 측정하였으며, 곡선부분은 직선부분의 구간과 같은 위치를 측정하였다. 측정포인트는 Fig. 2에 나타내었다.

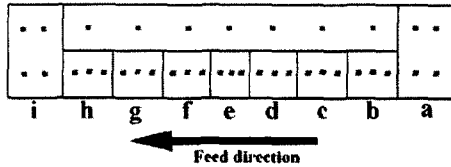


Fig. 2 Measuring point

Fig. 3과 Fig.4를 보면 일반적으로 알려진 가공특성인 상방향절삭(Upward Cutting)시 미절삭이 일어나고, 하방향절삭(Downward Cutting)시 과절삭이 일어나는 특성을 나타내고 있다. 가공결과는 Z축 가공오차 값이 최대 약 35 μ m 정도의 양호한 가공결과를 나타내었다. 이는 전 연구⁽⁵⁾에서의 AI가공 결과보다 좋게 나타났다. 가공소재가 난삭재임에도 불구하고 Z축 가공 오차값이 좋게 나타난 것은 가공공구의 차이, 가공소재의 열특성, 가공환경의 변화 등이 영향을 미쳤다고 생각된다. 또한, 가공순서에 따라 약간의 오차값 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 절삭깊이와 이송속도의 영향보다는 가공조건 선정시 공구마모를 무시했기 때문이다. 실질적으로 공구의코팅마모가 일어나면서 코팅마모만큼의 가공오차가 발생하였다고 볼 수 있다. 그리고, Z축 가공

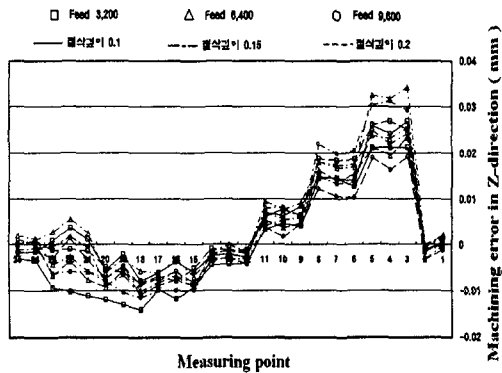


Fig. 3 Machining Error in Z-direction according to Cutting Condition (Linear Part)

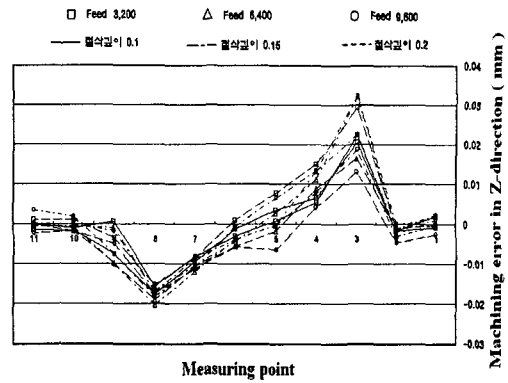


Fig. 4 Machining Error in Z-direction according to Cutting Condition (Curve Part)

오차값에 대해 실험계획법을 통한 분산분석 결과 절삭 깊이와 이송속도는 Z축 가공오차에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 5와 Fig. 6은 시편의 직선부분, 곡선부분에 대한 표면거칠기 결과를 그래프로 나타내었다. 본 실험에서 Cusp 높이를 0.001mm로 설정하여 가공하였는데 표면거칠기 대체적으로 양호한 것을 볼 수 있다.

일반적으로 볼랜드밀을 이용하여 평면을 가공할 때 보다 경사면을 가공할 때 표면거칠기가 양호하게 나오는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 5에서는 경사면에서 표면거칠기(Ra)가 평면에서의 표면거칠기보다 모두 양호하게 나타나는 것은 아니다. 이는 가공조건마다의 영향보다는 가공환경의 영향이 크게 작용했다고 생각된다.

전체적인 그래프 형태를 보면 W형태를 나타낸다. 즉, 상향, 하향 30. 구간(c, g)에서 상대적으로 양호한 표면거칠기를 나타내고 있다. 그리고, 각 이송속도별로 가공결과를 보면 3200mm/min가 상대적으로 양호한 표면거칠기를 나타내고 있으며, 절삭깊이는 0.1mm에서 상대적으로 양호한 표면거칠기를 나타내었다.

절삭깊이와 이송속도가 가공에 미치는 영향을 파악하기 위해 분산분석을 실시하였다. Table 4는 절삭깊이와 이송속도에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. 분석결과 절삭깊이와 이송속도는 모든 가공경사각에서 표면거칠기에 아무런 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 결과⁽⁵⁾에 비해 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 일정 절삭깊이와 이송속도까지는 가공영향이 줄어들음을 확인할 수

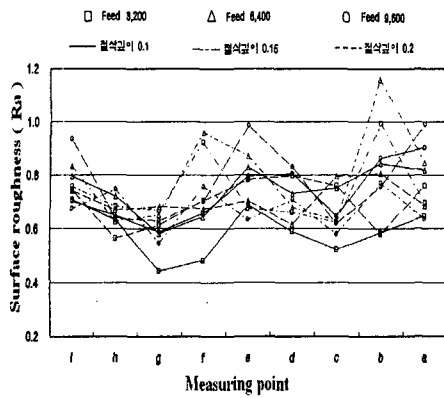


Fig. 5 Surface roughness according to measuring point (Linear Part)

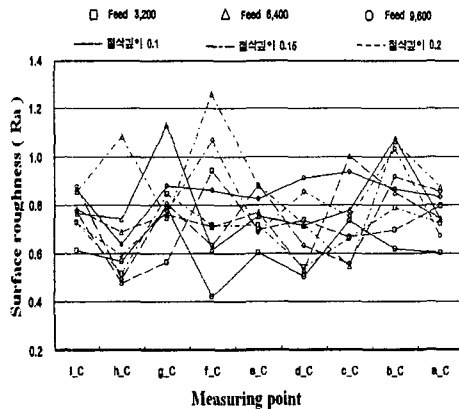


Fig. 6 Surface roughness according to measuring point (Curve Part)

Table 4 Surface Roughness Analysis of Variance Table

Source	S	ϕ	V	F ₀	F (0.10)	F (0.05)	F (0.01)
A	0.01234	2	0.00617	1.62149	4.32	6.94	18.0
B	0.00903	2	0.00451	1.18651	4.32	6.94	18.0
E	0.01522	4	0.00381				
T	0.03659	8					

※ · A : Depth of Cut · B : Feed rate · E : Error
 · T : Sum · S : Variation · V : Mean squared
 · ϕ : Degree of freedom

있다. 따라서, STD11이라는 난삭성 소재에 대해서

어느 정도까지의 절삭깊이와 이송속도를 유지해도 가공결과에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 즉, STD11에서는 절삭깊이와 이송속도를 어느정도의 값까지 크게 유지하는 가공이 좋다고 생각할 수 있다.

3.2 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공실험

절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험과 같은 방법으로 가공실험을 실시하였다. Fig. 7과 Fig. 8을 보면 Z축 가공오차 결과는 절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험에서와 유사하게 전체적으로 일반적 가공경향을 나타내고 있다. 오차값은 최대 약 25 μ m 정도의 양호한 결과를 나타내고 있다. 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공실험에서도 가공순서에 따라 수 μ m 정도의 오차값이 발생하였다. 이는, 절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험에서와 마찬가지로 공구 코팅 마모에 의한 오차값임을 알 수 있다.

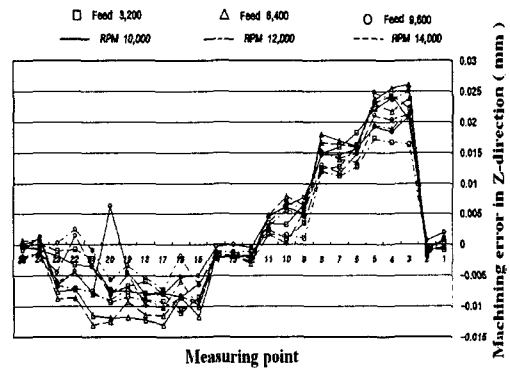


Fig. 7 Machining Error in Z-direction according to Cutting Condition (Linear Part)

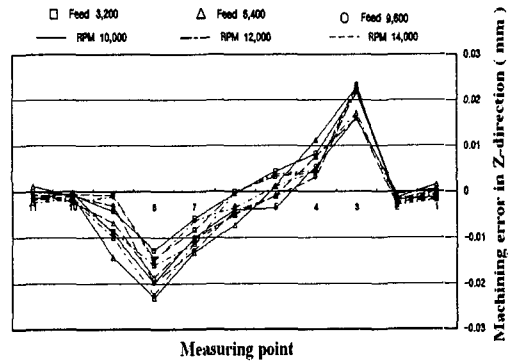


Fig. 8 Machining Error in Z-direction according to Cutting Condition (Curve Part)

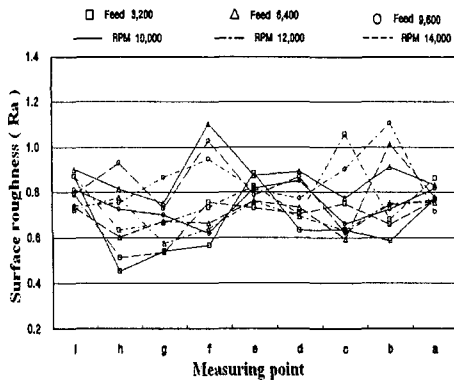


Fig. 9 Surface roughness according to measuring point (Linear Part)

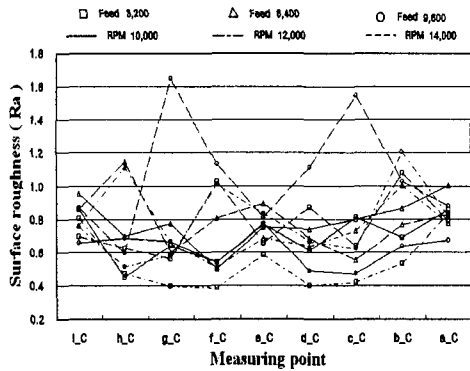


Fig. 10 Surface roughness according to measuring point (Curve Part)

Table 5 Surface Roughness Analysis of Variance Table

Source	S	ϕ	V	F ₀	F (0.10)	F (0.05)	F (0.01)
A	0.00175	2	0.00087	0.12408	4.32	6.94	18.0
B	0.01249	2	0.00625	0.88736	4.32	6.94	18.0
E	0.02816	4	0.00704				
T	0.04240	8					

※ · A : RPM · B : Feed rate · E : Error
 · T : Sum · S : Variation · V : Mean squared
 · ϕ : Degree of freedom

절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험과 같은 방법으로 표면거칠기를 측정하였다. Fig.9와 Fig. 10은 시편의 직선부분과 곡선부분의 표면거칠기를 나타낸 그래프이다. 표면거칠기가 절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험에서와 유사한 결과가 나왔다. 가공경향도 전체적으로 W형태를 나타내고 있다. 일반적인 가공에서 낮은 이송속도, 높은 주축회전수에서 양호한 결과를 나타낸다고 알려져 있다. 그러나, 이송속도별, 주축회전수별 표면거칠기는 일반적인 경향을 확인할 수 없다. 이에 이송속도와 주축회전수의 가공 영향을 확인하기 위해 분산분석을 통해 분석한 결과 이송속도와 주축회전수는 표면거칠기에 유의하지 않게 나타났다. Table 5는 이송속도와 주축회전수에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. 즉, 표면거칠기에는 이송속도와 주축회전수가 모두 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다. 이는, 전 연구⁽⁵⁾와 비교해보면 AI과 같은 연질 소재에 비해 STD11이라는 소재가 절삭조건의 영향이 줄어들었음을 확인할 수 있다. 즉, STD11이라는 소재에 대해서는 절삭깊이, 이송속도를 고려한 실험과 마찬가지로 어느 정도의 이송속도와 주축회전수까지는 가공에 미치는 영향이 작다는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반 금형 업체에서 STD11 소재로 가공을 할 때 시간 및 비용을 줄이기 위해 고속가공을 하는 것이 유리하다는 것을 증명해주고 있다.

3.3 절삭력 측정

고속가공에 대한 연구가 활발히 이루어지면서 절삭메카니즘에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 특히, 볼 엔드밀 가공에 대한 연구^(6,7)가 활발히 이루어지고 있다.

주축회전수 14000rpm, 이송속도 3200mm/min, 절삭깊이 0.1mm에 대해 실험하였다. 공구동력계는 약 4kHz의 주파수를 측정할 수 있는 KISTLER 9256A를 사용하였고, 증폭기는 KISTLER 5019A를 사용하였다.

시편은 공구동력계의 최대 측정 크기를 고려하여 Fig.1 시편의 a, i 평면부분을 제외 시켰다.

Fig.11은 시편에 대한 절삭력 측정 그래프를 나타내었다. 절삭력은 함력으로 나타내었으며, 평면부분(e)에서 가장 큰 절삭력을 나타낸다. 이는 표면거칠기와 비교하여 볼 때 가장 좋지 않은 표면거칠기를 확인할 수 있다.

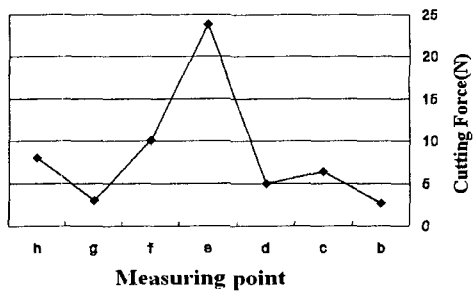


Fig. 11 Cutting Force according to measuring point

4. 결론

본 논문은 국내에서 생산된 고속가공기를 이용하여 볼엔드밀에 의한 STD11 절삭실험을 통해, 고속가공기의 가공조건에 따른 고속가공의 가공 특성을 파악하고, 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수가 표면거칠기와 가공오차에 미치는 영향을 분산분석을 통해 분석하였으며, 절삭력 측정을 통해 절삭력이 가공결과에 미치는 영향을 확인하였다. 그러나, 본 연구의 절삭조건이 14000rpm이라는 한정된 범위이기 때문에 더 빠른 주축회전수에서의 가공 연구의 필요성이 사료된다.

본 실험에서 수행한 가공조건의 범위에서 각 조건에 의한 영향은 다음과 같다.

1. STD11 가공실험 결과를 분산분석을 통해 분석한 결과, 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수는 Z축 가공오차에 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다.

2. STD11 가공실험 결과를 분산분석을 통해 분석한 결과, 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수는 표면 거칠기에 AI과 같은 연질 소재보다 적은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 STD11 가공시 일정 범위 안에서는 표면거칠기에 영향을 미치지 않으므로 고속가공의 적용이 유리함을 확인하였다.

3. 본 실험에서 가공실험을 한 결과 Z축 가공 오차에서 상방향절삭에서의 미절삭과 하방향절삭에서의 과절삭 현상을 확인하였다. 이는 일반적인 가공이론이 적용됨을 확인하였다.

4. 본 실험에서 절삭력 측정 결과, 절삭력과 표면거칠기에 밀접한 상관관계를 확인하였다. 이는 일반 가공업체에서 절삭력을 적게 할 수 있다면 보다는 표면 거칠기를 얻을 수 있다.

후기

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

참고문헌

1. R. I. King, R. L. Vaughn, "A Synoptic view of High-Speed Machining From Salomon to the Present", Ann. ASME, Dec.1984, pp.1~13.
2. J. Tlustý, "High speed milling", Proceedings of the 6th Int. machine tool engineers conference(IMEC), pp. 35~60, 1994.
3. 양민양, "절삭가공 이론과 실제", 청문각, pp 174, 183, 1997.
4. 고태조, 정훈, 김희술, "고속 볼엔드밀링에서 공구마모를 고려한 공구의 가공경사각 선정", 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 9, pp. 135~144, 1998.
5. 이춘만, 최치혁, 정원지, 정종윤, 고태조, 김태영, 고속절삭가공기술개발, 한국공작기계학회 '2002년도 춘계학술대회 논문집, pp. 266~271, 2002.
6. Milton C.Shaw, Metal Cutting Principles, 1986.
7. P.Mathew and P.L.B.Oxley, "Predicting the Effects of Very High Cutting Speeds on Cutting Forces, etc.", CIRP Vol.31/1/1982, pp.49~52.
8. J. F. Kahles, M. Field and S. M. Harvey, "High Speed Machining Possibilities and Need", CIRP Vol.27/2/1978, pp.551~560.
9. 이종찬, "고속가공기술", 한국공작기계학회 '98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 5~10, 1998.
10. H. Schulz, St. Hock, "High-speed Milling of Dies and Molds - Cutting Conditions and Technology", Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 35~38, 1995.
11. 김경균, 강명창, 이득우, 김정석, "볼 엔드밀을 이용한 고속가공에서 금형제품의 형상가공 특성 파악", 한국정밀공학회 '97추계학술대회 논문집, pp. 143~146, 1997.
12. 정훈, "고속엔드밀링에서 가공면 경계표현법을 통한 공구경로 방향 선정", 영남대학교 석사학위논문, 1997.