

## 고속절삭가공기술개발

### Development of High Speed Machining Technology

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 and spindle revolution 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 of the high speed machining.

Key Words : High-speed machining, Two-way factorial design, Surface roughness, Design of experiments, Machining error in Z-direction

#### 1. 서론

최근 산업현장의 생산성 향상과 품질향상을 위하여 고속화, 고정도화가 요구된다. 따라서, 각종 기계 구성 부품의 가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여 주고, 생산성의 개선은 가공경비를 감소시켜 경쟁력을 강화시킨다. 특히 최근 금형 가공에서 요구되는 납기단축과 제조경비절감에 따른 생산성 향상에 따라 절삭가공에서의 고능력, 고정밀도, 난삭재 절삭에 대한 대응이 요구되고 있다. 이에, 여러 공업선진국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 고속가공(High-Speed Machining)은<sup>(1,2)</sup> 이러한 문제점을 해결하는 장점을 가지고 있다. 고속가공에서는 주축회전수(rpm)를 증가시킴으로써 높

은 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.<sup>(3)</sup>

국내에서도 많은 장점을 가지고 있는 고속가공 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 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 3차원 고속가공기를 이용한 자유곡면가공을 많이 하는 금형업체에서 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

#### 2. 실험장치 및 실험방법

본 논문에서 사용된 고속가공기는 수직형머시닝센터로 최대 주축회전수 20,000rpm., 최대 급속·절삭 이송속도 40m/min 이다.

수직형머시닝센터에서 블엔드밀을 가지고 공작물을 가공할 때, 블엔드밀의 기하학적인 형상 특성으로 인해, 가공 표면이 좋지 않게 나타난다. 보고된 바에 의하면 경사각을 10° ~ 20° 로 설정함으로써 고속가공시 절삭의 최적화를 이룰 수 있다고 보고되고 있다.<sup>(4)</sup> 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같이

시편 형상의 직선 경사부분을 45°, 30°, 15° 로 설정하여 경사각에 따른 가공 특성을 살펴보았다. 또한 원호부분은 NURBS 보간을 사용하여 가공하였다. 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 절삭 부위가 다르게 나타난다. 이에 본 논문에서는 상방향절삭과 하방향절삭의 가공특성을 파악할수 있게 Fig. 1과 같이 좌우 대칭인 형상으로 시편을 결정하였다.

본 실험에 사용된 공구는 알루미늄 전용 공구로 날수가 2개인  $\phi 6$ -볼엔드밀이고, 시편재질은 알루미늄 60XX계열을 사용하였다. 이는 절삭력을 최소화시킴으로써 고속가공기의 측에 대한 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서이다. 피크피드량은 0.15mm, Cusp 높이가 0.001mm로 하여 CAMTOOL을 이용하여 NC-code를 생성하였다.

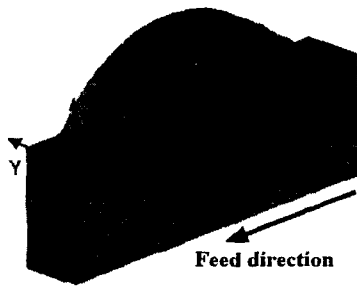


Fig. 1 Modeling of sample

논문의 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 영향을 주는 인자이기 때문이다. 본 논문에서는 5회의 기본실험과 2회의 부수적인 실험을 실시하였는데, 기본실험의 첫 번째는 절삭깊이와 이송속도를 제어인자로 하였고, 두 번째는 주축회전수와 이송속도를 제어인자로 하였다. 세 번째는 두 번째 실험을 보완하여 실시하였다. 네 번째는 같은 기종의 다른 장비를 사용하여 실험하였고, 다섯 번째는 HPCC ON/OFF 비교 가공을 하였다. 2회의 부수적인 실험은 실험 결과에 따른 분석을 위해 실시하였다. 각 실험에서 인자의 수준은 Table 1 ~ Table 4

와 같이 결정하였다. 이 수준은 현장에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 값이다. 가공순서는 난수표를 사용하여 완전 랜덤화 하여 실시하였다. 그리고 일반적으로 중삭, 정삭 가공시 고정도윤곽보정기능(HPCC)을 사용하여 가공하였다.

Table 1 Factors and levels for first experimental machining according to depth of cut and feed rate (RPM : 16000rpm)

Factor			Level		
Sign	Factor	Unit	1	2	3
A	Depth of cu	mm	0.1	0.2	0.3
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600

Table 2 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	4
A	RPM	rpm	12000	14000	18000	20000
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600	

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

Factor			Level				
Sign	Factor	Unit	1	2	3	4	5
A	RPM	rpm	12000	14000	16000	18000	20000
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600		

Table 4 Factors and levels for fourth experimental machining according to feed rate and spindle RPM (Depth of cut : 0.1mm)

Factor		Sample No.					
Factor	Unit	1	2	3	4	5	6
RPM	rpm	12000	12000	12000	14000	14000	14000
Feed rate	mm/min	3200	6400	9600	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.

### 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. 4는 직선보간으로 가공한 부분의 표면거칠기를 그래프로 나타내었다. 본 실험에서 Cusp 높이를 0.001mm로 설정하여 가공하였는데 표면거칠기 대체적으로 양호한 것을 볼 수 있다.

그러나 a, e, i 위치에서 표면거칠기가 아주 양호하게 나왔다. 이 부분은 경사각이 0° 인 평면인데, 일반적으로 블랜드밀을 이용하여 평면을 가공할 때 보다 경사면을 가공할 때 표면거칠기가 양호하게 나오는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 4에서는 평면에서 표면거칠기(Ra)가 대체적으로 0.2~0.4 μm 사이의 값으로 아주 양호하게 나왔다. 이것은 주축의 빠른 회전으로 인한 주축의 진동 발생으로 피삭재를 원활하게 절삭하지 못하고 공구가 표면을 문지르는 현상이 발생하여 표면거칠기가 양호하게 나타난 것으로 생각된다. 그리고 Fig. 4에서 평면 부위를 제외하면 d, f 부분에서 상대적으로 양호할 표면거칠기를 나타내고 있는데, d, f 부분은 15° 경사면이다. 이는 고태조<sup>(5)</sup>의 실험결과에서 블랜드밀을 이용하여 경사면을 가공할 때 공구의 마모와 절삭력, 표면거칠기등을 고려하였을 때 15° 경사면이 가장 적절할 경사면이라는 실험결과를 뒷받침해주고 있다.

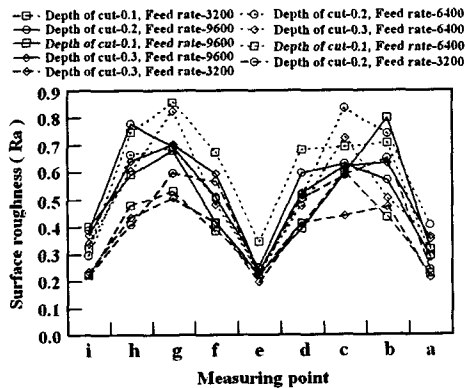


Fig. 4 Surface roughness according to measuring point (Linear interpolation)

공구의 문지름 현상이 발생한 평면부위를 제외한 나머지 경사면에 대해서 분산분석을 실시하였

다. 분석결과 절삭깊이는 모든 가공경사각에서 표면거칠기에 아무런 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이송속도는 유의수준 95%의 신뢰수준을 가지고 표면거칠기에 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이상의 결과를 가지고 이송속도의 95% 신뢰구간폭을 계산하면  $\pm 0.2183$ 이다. 이송속도의 각 수준에서 모평균의 점추정값을 그래프로 그리고 신뢰구간의 폭을 붙이면 이송속도의 95% 신뢰구간을 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 이송속도의 변화에 따라서 표면거칠기는 증가하는데 3200mm/min에서 가장 좋은 표면거칠기를 나타낸다고 볼 수 있다.

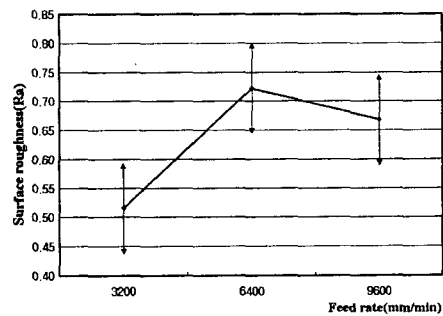


Fig. 5 Confidence interval of surface roughness for feed rate

#### 3.2 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공실험

절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험과 같은 방법으로 표면거칠기를 측정하였고, 실험은 3회에 걸쳐서 실시하였다. Fig. 6은 두 번째 실험에서 직선보간을 이용하여 가공한 부분의 표면거칠기를 나타내었다. 표면거칠기가 절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험에서와 유사한 결과가 나왔다.

이상의 측정결과를 이용하여 이상가공을 나타내는 a, e, i 부분을 제외한 나머지 부분의 표면거칠기를 분산분석을 통해 분석한 결과 주축회전수는 10% 유의수준에서 유의하고 이송속도는 1% 수준에서도 유의하다. 즉, 표면거칠기에는 이송속도와 주축회전수가 모두 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 분산분석 결과를 가지고 이송속도와 주축회전수의 신뢰구간을 추정하였다. 이송속도의 90% 신뢰구간폭을 계산하면  $\pm 0.05823$ 이고, 축회전수의 90% 신뢰구간폭을 계산하면  $\pm 0.05043$ 이다. 이송속도의 각 수준에서 모평균의 점추정값을 그래프로 그리고 신뢰구간의 폭을 붙이면 이송속도 90% 신뢰구간을 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있고, 주축회전

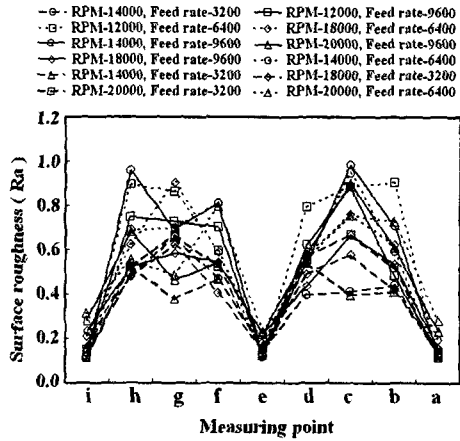


Fig. 6 Surface roughness according to measuring point (Linear interpolation)

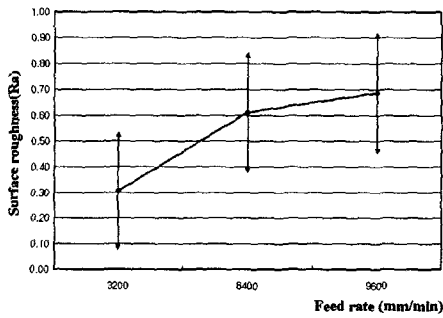


Fig. 7 Confidence interval of surface roughness for feed rate

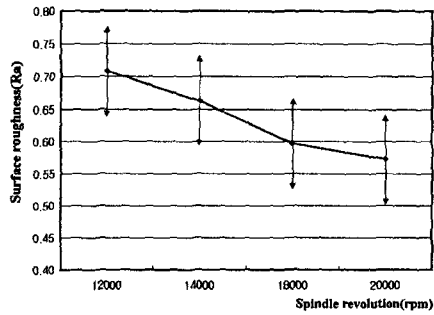


Fig. 8 Confidence interval of surface roughness for spindle RPM

수도 같은 방법으로 90% 신뢰구간을 Fig. 8과 같이

나타낼 수 있다. 이송속도가 3200mm/min 일 때 가장 좋은 표면거칠기를 나타내고, 주축회전수는 12000rpm에서 표면거칠기가 가장 나쁘고, 20000rpm에서 가장 좋다. 따라서 이송속도는 3200mm/min, 주축회전수는 20000rpm에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있다. 다음으로 이송속도와 주축회전수의 조합에서의 모평균의 점추정을 하였다. 점추정값은 0.4458이고 90% 신뢰구간폭은 0.1361이다. 따라서 확률 90%로 이송속도3200mm/min, 주축회전수 20000rpm으로 가공하였을때, 표면거칠기는 신뢰구간 0.3097과 0.5816 사이에 포함될 것이라고 기대된다.

세 번째 실험 가공에서는 최초 2회의 실험과 같은 방법으로 표면거칠기를 측정하였다. 표면거칠기는 두 번째 가공실험에서의 유사한 결과가 나왔지만, Fig. 9에서와 같이 최초 2회의 가공실험에서와 다르게 a, e, i의 평면가공부위가 다른 가공경사각을 가지는 부위보다 표면거칠기가 나쁘게 나왔다. 이것은 일반적 가공경향과 유사한 경향을 나타낸다.

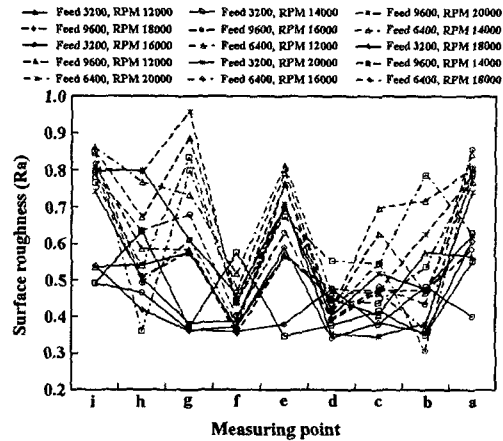


Fig. 9 Surface roughness according to measuring point (Linear interpolation)

이송속도와 주축회전수를 고려한 실험에서는 표면거칠기와 함께 3차원 측정기를 이용하여 가공 오차(Machining error)를 측정하였다. 가공 오차란 3차원 측정기를 이용하여 측정한 좌표값에서 모델링상의 좌표값을 뺀 값이다. 측정 위치는 표면거칠기를 측정한 위치와 동일하다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Z축 방향의 가공오차를 그래프화하여 나타냈는데, 그래프는 오른쪽이 상방향 절삭이 일어나는 부분이고 왼쪽이 하방향절삭이 일어나는 부분이다. 일반적인 가공이론에서 공구가

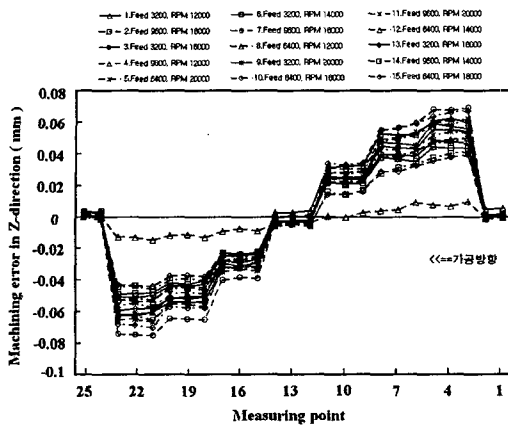


Fig. 10 Machining error in Z-direction according to cutting condition (Linear interpolation)

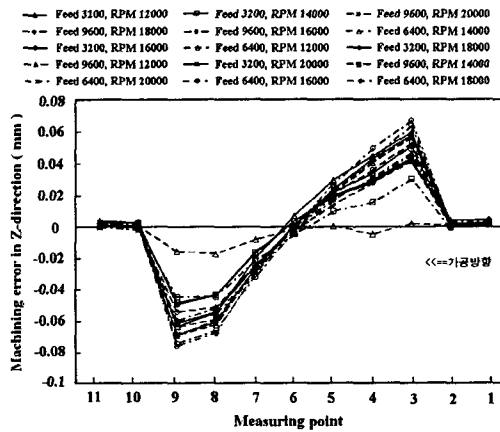


Fig. 11 Machining error in Z-direction according to cutting condition (NURBS interpolation)

회어지는 현상으로 인해 상방향절삭시는 미절삭이 일어나고 하방향절삭시는 과절삭이 일어나는 것으로 알려져 있다.<sup>(11)</sup> Fig. 10과 Fig. 11을 보면 이러한 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 10과 Fig. 11에서 보면 가공경사각이 0° 인 a, e, i 평면부위는 ± 5 $\mu$ m 보다 작은 가공오차가 나타나고 있다. 이것은 주축회전수와 이송속도는 가공오차에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. NURBS보간을 이용하여 가공을 하더라도 가공오차에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되지만, 가공시간은 직선보간을 이용한 가공보다 단축되는 것을 실험을 통해 확인하였다.

네 번째 실험 가공에서는 최초 3회 가공에서 발생한 문제점을 확인하기 위해서 동일기종의 다른 장비와 비교 절삭을 실시하였다. Fig. 12는 최초 가공했던 장비(A)의 Z축 가공 오차를 나타내었고, Fig. 13은 비교 절삭한 동일기종의 다른 장비(B)의 Z축 가공 오차를 나타내었다. A장비에서는 가공 오차값이 40 $\mu$ m 정도를 나타내고, 가공경향이 일반적 경향과 반대의 그래프를 보여주고 있다. 반면 B장비는 오차값이 4 ~ 25 $\mu$ m이고 일반적 경향과 같은 경향을 나타내고 있다. 4회의 가공결과를 본다면 A장비의 경향이 일관성이 없음을 알 수 있다. 이는 장비의 주축 진동 발생 및 장비 강성에 이상이 발생했다고 판단된다.

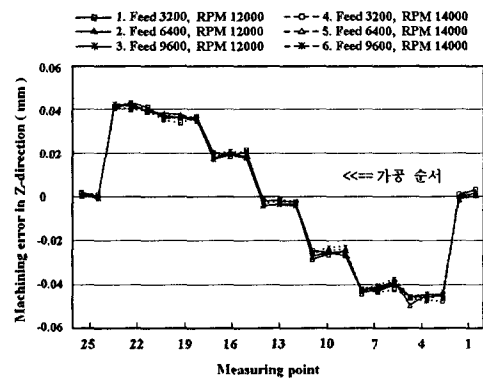


Fig. 12 Machining error in Z-direction to A

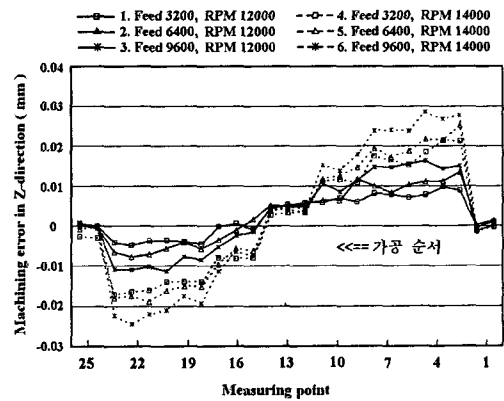


Fig. 13 Machining error in Z-direction to B

#### 4. 결론

본 논문은 국내에서 생산된 고속가공기를 이용하여 볼엔드밀에 의한 절삭실험을 통해, 고속가공기의 가공조건에 따른 고속가공의 가공 특성을 파악하고, 고속가공기의 성능을 평가하기 위해 이원배치법을 적용하여 실험을 실시하였고, 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수가 표면거칠기와 가공오차에 미치는 영향을 분산분석을 통해 분석하였다.

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

1. 이원배치법을 적용하여 실시한 본 실험 결과를 분산분석을 통해 분석한 결과, 절삭깊이는 표면거칠기에 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 확인 할 수 있었는데, 이것은 고속가공시 절삭깊이에 따른 공구의 절삭부하를 높은 주축회전수로 공구의 절삭부하를 감소시키기 때문이다.
2. 이송속도와 주축회전수는 비교적 낮은 가공경사각( 30° )에서 표면거칠기에 유의한 영향을 미치고 있다. 이송속도와 주축회전수는 절삭이 일어날 때 공구의 절삭부하에 영향을 주는 인자이며 절삭부하를 줄이면 표면거칠기가 좋아지게 된다. 본 가공실험 결과에서도 절삭부하를 줄일 수 있도록 이송속도를 줄이고 주축회전수를 높임으로써 좋은 표면조도를 얻을 수 있다.
3. 본 실험에서 가공실험을 한 결과 Z축 가공 오차에서 상방향절삭에서의 미절삭과 하방향절삭에서의 과절삭 현상을 확인하였다. 이는 일반적인 가공이론에서 공구가 휘어지는 현상으로 인해 상방향절삭시는 미절삭이 일어나고 하방향절삭시는 과절삭이 일어나는 현상이 적용됨을 확인하였다.
4. 본 실험에서 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수를 변화시켜가며 가공실험을 한 결과 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수는 가공오차에 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.

#### 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. 이종찬, "고속가공기술", 한국공작기계학회 '98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 5~10, 1998.
5. J. F. Kahles, M. Field and S. M. Harvey, "High Speed Machining Possibilities and Need", CIRP Vol.27/2/1978, pp.551~560.
6. 고태조, 정훈, 김희술, "고속 볼엔드밀링에서 공구마모를 고려한 공구의 가공경사각 선정", 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 9, pp. 135~144, 1998.
7. 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.
8. 박성현, "현대 실험계획법", 민영사, pp. 681~682, 2000.
9. 김경관, 강명창, 이득우, 김정석, "볼 엔드밀을 이용한 고속가공에서 금형제품의 형상가공 특성 파악", 한국정밀공학회 '97추계학술대회 논문집, pp. 143~146, 1997.
10. 정훈, "고속엔드밀링에서 가공면 경계표현법을 통한 공구경로 방향 선정", 영남대학교 석사학위논문, 1997.
11. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, "CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공", 회중당, pp. 357 ~ 358, 1997.
12. 박희영, 고혜주, 윤헌구, 정윤교, "금형가공을 위한 고속·고정도 가공기술의 연구", 한국공작기계학회 '99년도 추계학술대회 논문집, pp. 221 ~ 226, 1999.
13. 강철휘, "공작기계기술의 현재와 미래(3)", 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 6, pp. 5 ~ 12, 1995.
14. 손창수, 강명창, 김정석, 이득우, 황경현, 김종관, "볼 엔드밀을 이용한 난삭재의 고속가공 특성", 한국정밀공학회 '97년도 추계학술대회 논문집, pp. 139 ~ 142, 1997.