

고속회전을 이용한 마이크로 엔드밀의 가공특성

김기수* · 김상진** · 조병무*** · 김형철****

<국문초록>

최근 마이크로 엔드밀을 이용한 가공은 소형구조물이나 소형기계의 부품과 금형산업에서 양호한 표면 거칠기와 가공시간의 단축을 위해 고정도의 기술을 요구하고 있다. 마이크로 엔드밀을 이용한 가공에 있어서 가공조건은 절삭면의 표면거칠기에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 마이크로 엔드밀을 이용하여 스테인리스 강(STS 304)의 표면을 가공하였고, 실험계획법에 의해 최적의 표면거칠기를 얻기 위한 가공조건에 대해 분산분석하였다.

본 연구를 통하여 마이크로 엔드밀에 의한 가공에서 가공조건은 절삭깊이, 스펀들의 회전수, 이송속도의 순서로 표면거칠기에 영향을 미치는 것을 알았다.

주요어 : 마이크로 엔드밀, 표면거칠기, 실험계획법, 분산분석

* 교신저자, 이메일(kksoo@cnu.ac.kr), 충남대학교 기술교육과

** 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

*** 충남대학교 공과대학 기계공학과

**** 충북과학대학 기계자동차과

I. 서론

1. 연구의 필요성

최근 공작기계 기술의 커다란 흐름은 고속 지능화, 미세화를 추구하고 있고, 선진국들을 중심으로 Milli-structure나 Micro machine의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기계부품의 소형화가 진행되면서 작은 부품에 대한 가공이 주요 요소기술로서 차지하는 중요성이 매우 크게 대두되고 있다.

산업현장에서 널리 사용되는 고속 가공기는 주축의 회전수(rpm)를 증가시킴으로서 높은 절삭속도를 얻을 수 있고, 절삭속도의 증가에 따라 기존의 이송속도보다 훨씬 빠른 이송속도로 절삭이 가능하기 때문에 생산단가의 절감과 생산성의 향상에 장점을 가지고 있다. 또한 일반 범용공작기계로 가공이 곤란한 곡면가공을 위한 미소피크피드, 미소 직선분할이 가능하므로 고정도의 제품을 가공할 수 있다. 고속회전을 통해 1날 당의 미소이송이 가능하여 절삭면의 표면거칠기의 향상과 가공시간의 단축이 동시에 이루어질 수 있는 장점을 가지고 있어 생산 분야에 빠르게 이용되고 있다. 이 중에서 평면 엔드밀에 의한 고속가공은 슬롯, 포켓 및 표면가공 등 다양한 형상의 정삭가공에 유용하게 사용되고 있다(Nakamura, S., 1996). 특히 금형가공에 있어서는 그것을 구성하는 각종 요소기술의 개발이나 코팅한 초경합금 공구 등의 성능이 향상됨으로서 종래에 방전가공이나 연삭가공에 의존하고 있었던 자동차 부품의 주조나 단조 등에 이르기 까지 공정집약, 고효율 가공에 유용한 고속가공기의 사용빈도가 점차 증가하고 있는 추세에 있다(Dewes, R. C., Apinwall, D. K., 1995).

하지만 작은 부품의 생산을 위한 금형의 경우는 매우 작은 슬롯 홈과 포켓이 존재하게 되고, 이 부분에 대한 가공의 정도는 제품의 품질 및 생산성에 중요한 영향을 미치게 된다. 현재 보급되어있는 고속 가공기는 마이크로 엔드밀에 의한 가공시 공구의 직경이 매우 작아 주 절삭속도가 현저히 저하하게 되어 엔드밀의 파괴, 절삭면의 품질 저하, 가공시 이송속도의 저하에 따른 제품의 가공시간이 늘어나는 단점을 가지고 있다(이춘만 외 4, 2003)

따라서 본 연구에서는 개발한 고속회전의 초정밀 에어 베어링 스핀들을 사용하여 마이크로 엔드밀을 이용한 절삭가공을 실시하였다. 마이크로 엔드밀에 의한 슬롯가공을 통하여 고속 가공 조건(J.K. Park, C.M. Lee, D.W. Lee, 2003) 즉, 스핀들의 회전수, 절삭 깊이, 이송속도 등 가공인자의 변화에 따른 가공면의 표면거칠기

를 정량적으로 분석함으로써 마이크로 엔드밀 가공시 가공인자의 영향을 분석하였다.

II. 관련 이론

마이크로 엔드밀에 의한 표면가공에서 피삭재의 표면거칠기에는 많은 인자들이 복합적으로 영향을 주게 된다. 하지만 어떤 특정한 인자 하나만의 영향을 조사하기 위해 각 인자의 일원 배치에 의한 실험결과를 분산분석하였다(박성현, 1990 ; 2002).

분산분석(analysis of variance)이란 특성치의 산포를 제곱 합(sum of squares : 변동 또는 자승합)으로 나타내고 이 제곱 합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 인자의 제곱합을 그 인자의 자유도로 나누면 그 인자의 제곱평균이 되며 오차 분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하는 함으로서 어느 원인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이다.

반복이 없는 세 개의 요인에 대한 변동의 분해는 총 변동 S_T 를, 각 인자에 의한 변동인 S_A, S_B, S_C 로 나누는 것이다. 이를 계산하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$CT = \frac{T^2}{lmm} \quad (1)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (\overline{x_{ijk}} - \bar{x})^2 = \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk}^2 - CT \quad (2)$$

$$S_A = \sum_i \sum_j \sum_k (\overline{x_{i..}} - \bar{x})^2 = \sum_i \frac{T_i^2}{mn} - CT \quad (3)$$

여기서, 제시한 식에서 T 는 데이터의 총합, T_i 는 인자의 수준이 i 인 경우의 데이터의 합, l, m, n 은 실험 인자에서 각각 A, B, C 의 수준의 수가 된다.

n은 전체 실험 횟수가 된다.

가공에 있어서 각 인자가 표면거칠기에 미치는 영향을 분산분석을 통해 분석하였으며, 또한 다구찌 기법의 손실함수(SN비)를 이용하여 특성치에 대한 망소특성을 조사하였다. 망소특성에 관한 손실함수는 식 (4)과 같다.

$$SN = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}$$

(4)

여기서, y는 특성값(표면거칠기), n은 실험횟수를 나타내고 있다.

III. 실험장치 및 방법

1. 실험장치 및 실험재료

마이크로 엔드밀에 의한 절삭실험을 위해 사용한 NC 밀링은 독일 DECKEL사의 FP2NC이다. NC밀링의 최대 절삭이송속도는 40m/min이고, 최소 이송량은 1μm이다. NC 밀링 주축의 최대회전수가 작아 마이크로 엔드밀에 의한 가공에 부적합하므로 고속 고정밀 공기 정압 베어링 스피들의 NC 밀링의 주축에 지그를 통해 부착하여 사용하였다.

실험에 사용한 공기 정압 베어링 스피들은 인버터(invertor)를 이용하여 최대속도 125,000rpm까지 조절할 수 있고, 콜렛에서 20mm떨어진 엔드밀 선단의 런아웃(run-out)은 최대 5μm, 스피들 모터의 최대출력은 0.75kW이다.

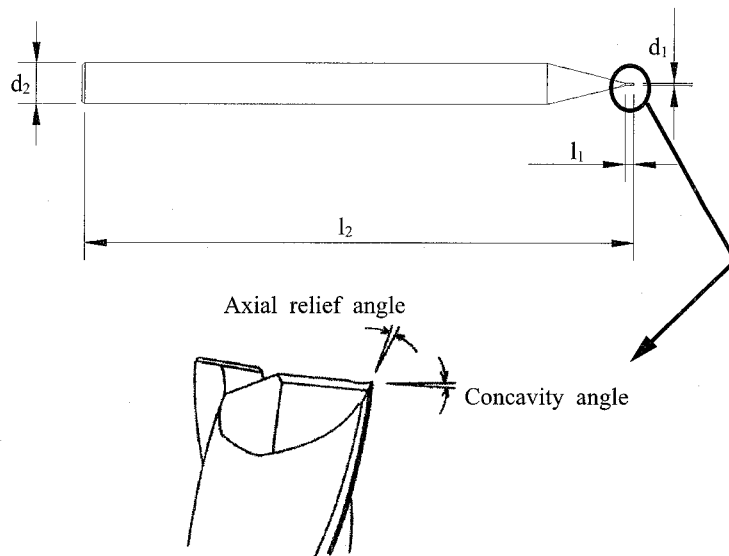
실험에 사용된 시편의 재질은 난삭재 중 하나인 스테인리스(STS 304)를 사용하였으며, 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 <표 1>과 <표 2>와 같다. 또한 Fig. 1는 사용한 공구의 형상을 나타낸 것이며, <표 3>은 사용공구의 재원을 표시한 것이다.

<표 1> STS 304의 화학적 성분

wt. %									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	others
0.1014	0.799	1.5197	0.0276	0.0061	7.8623	17.695	0.1280	0.2558	0.810

<표 2> STS 304의 기계적 성질

Yield strength (MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)	Rockwell Hardness(HRB)
375	769	40	88



[그림 1] 사용 엔드밀의 형상

<표 3> 엔드밀의 제원

Number of edge	2ea
Helical angle	30°
Length of total tool (l_2)	38
Length of cut (l_1)	0.4mm
Diameter of shank (d_2)	3mm
Diameter of mill (d_1)	0.2mm
Axial relief angle	9°
Concavity angle	2.5°

가공된 시편은 공구현미경을 통해 표면의 형상을 확대하여 관찰하였으며, 표면 거칠기를 측정하기 위해 광학계를 이용한 비접촉식 측정기인 surface measurement system NT 2000을 사용하여 평가하였다. 사용한 표면거칠기 측정기의 주요사양은 수직 분해능(Vertical resolution) 0.1nm 이하, 최대측정범위는 100mm × 100mm, 수직방향 측정 폭은 0.1mm - 150mm, 반복정확도 0.1nm, 자동 초점 이동방식을 사용하는 장비이다.

2. 실험방법

마이크로 엔드밀에 의한 가공실험을 위해 본 실험에서는 공구의 회전수, 절삭 깊이, 이송속도를 가공인자로 선정하고 각 가공인자의 수준을 변화시키면서 실험을 하였다. 각각의 실험조건을 <표 4>에 표시하였다.

<표 4> 엔드밀을 이용한 절삭실험 조건

회전수(RPM)	절삭깊이(mm)	이송속도(mm/min)
80,000	0.01	30, 60, 90
	0.02	
	0.03	
100,000	0.01	30, 60, 90, 120
	0.02	
	0.03	
120,000	0.01	30, 60, 90, 120
	0.02	
	0.03	

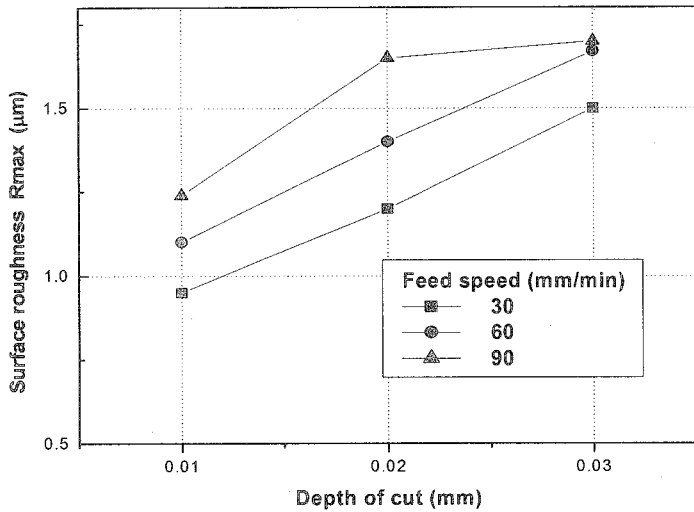
마이크로 엔드밀에 의한 가공은 가공의 깊이가 매우 작으므로 가공시편의 평면도 오차를 최소화하기 위해 평면도가 0.01mm 이하가 되도록 평면연삭 후 사용하였으며 고정시 시편의 평면도 오차를 최소화하기 위해 절삭 깊이 0.005mm의 초기 마이크로 엔드밀 가공 후 본 실험을 실시하였다. 또한 절삭실험은 공구의 마멸에 의한 영향을 최소화하기 위해 매 실험마다 공구를 교환하여 실시하였다. 그리고 가공방법으로는 건식절삭방법을 이용하였다.

실험 후 특성치로는 가공 바닥면의 표면거칠기에 대하여 평가하였다. 가공인자의 영향을 분석하기 위해 최대 표면 거칠기인 $R_{max}(\mu m)$ 를 측정하였으며, 측정의 오차를 줄이기 위해 10회를 측정하여 평균을 구해 사용하였다. 가공면의 표면거칠기에 대해 일원배치 분산분석을 이용하여 가공인자의 영향과 최적의 조건을 조사하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

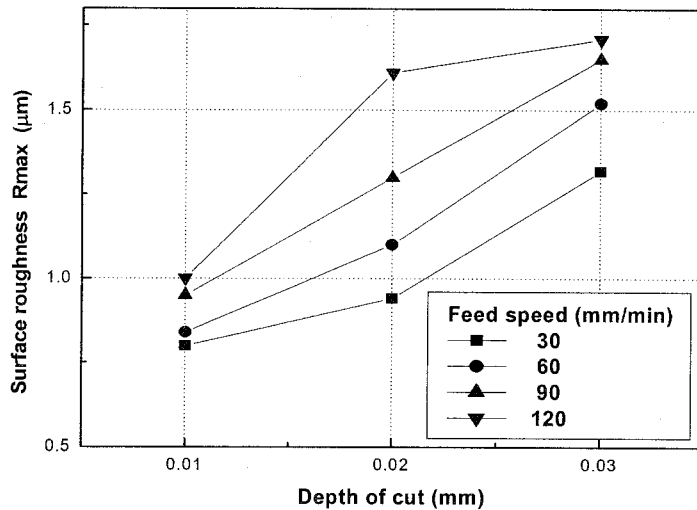
[그림 2]는 80,000rpm에서 절삭 깊이와 이송속도 변화에 따른 가공면의 최대 표면거칠기 분포에 대해 나타낸 것이다. 가공면의 표면거칠기 분포를 보면 이송속도 및 절삭깊이의 증가에 따라 표면거칠기가 상승함을 보여주고 있다. 이송속도가 30mm/min과 60mm/min인 경우는 절삭 깊이의 변화에 따라 일정하게 표면거칠기가 상

승하지만, 이송속도가 90mm/min인 경우에는 절삭깊이가 0.01mm에서 0.02mm로 상승하는 구간에서 급격하게 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 이 구간을 거치면서 공구는 과도한 절삭을 하기 때문으로 판단된다. 또한 가공면의 표면거칠기는 이송속도보다 절삭깊이에 더 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 2] 회전수 80,000rpm에서 절삭깊이와 이송속도에 따른 표면거칠기

[그림 3]은 100,000rpm에서 절삭 깊이와 이송속도 변화에 따른 가공면의 최대 표면거칠기 분포에 대해 나타낸 것이다. 가공면의 표면거칠기 분포를 보면 80,000rpm에서의 경향과 유사하게 나타남을 알 수 있다. 하지만 이송속도와 절삭깊이가 같은 경우에는 80,000rpm의 표면거칠기보다 양호한 면을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 회전수의 증가에 따라 과도한 절삭에 의해 표면거칠기가 급 상승하는 구간은 80,000rpm의 경우보다 이송속도가 더 빠른 120mm/min의 이송조건에서 발생함을 알 수 있다.

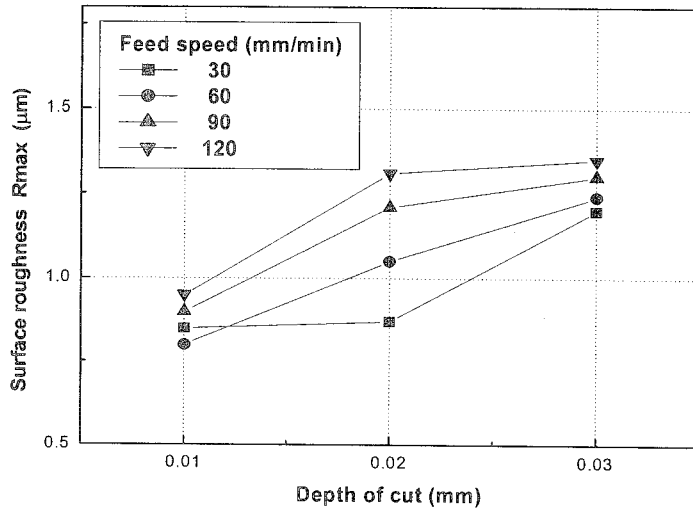


[그림 3] 회전수 100,000rpm에서 절삭깊이와 이송속도에 따른 표면거칠기

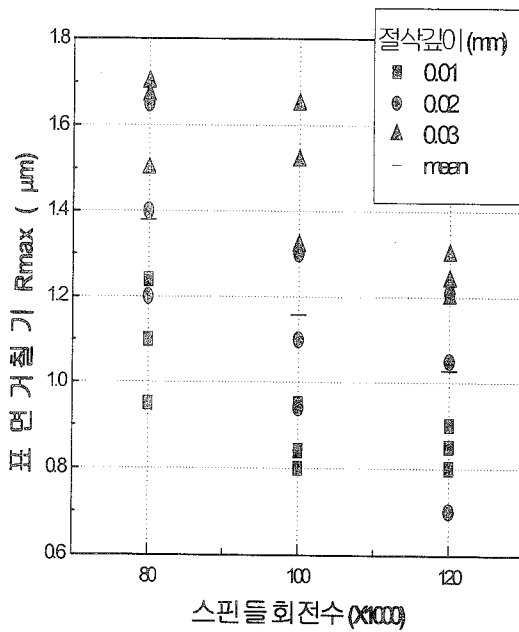
[그림 4]은 120,000rpm에서 절삭 깊이와 이송속도 변화에 따른 가공면의 최대 표면거칠기 분포에 대해 나타낸 것이다. 가공면의 표면거칠기 분포를 보면 80,000rpm이나 100,000rpm의 분포에서 나타났던 표면거칠기가 급격하게 증가하는 구간이 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 스피들의 회전수 증가에 따라 절삭속도가 충분히 커져 과도한 절삭이 발생하는 구간이 없음을 보여주고 있다. 또한 절삭 깊이가 0.01mm인 조건에서 이송속도가 30mm/min인 조건보다 60mm/min인 구간에서 표면거칠기가 더 양호하게 나타났으며 이송속도가 30mm/min인 조건에서는 절삭깊이가 0.01mm인 경우나 0.02mm인 경우의 표면거칠기가 거의 유사함을 나타내고 있다. 이는 공구 1개 날 당 제거체적을 작게 하는 것이 표면거칠기를 양호하게 하는 것이 아니고 스피들의 회전수가 높아짐에 따라 이송속도나 절삭깊이의 증가를 통해 공구 1개 날 당 제거체적을 적절하게 증가시켜야 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

[그림 5]는 각각의 절삭 깊이와 이송속도에서 주축의 회전수의 변화에 따른 가공시편의 표면거칠기를 나타낸 것이다. Fig. 4.5에서 평균(mean)의 표시는 표면거칠기 분포의 평균값을 의미한다. 스피들의 회전수 증가에 따라 표면거칠기 분포의 평균값은 낮게 나타남을 알 수 있다. 스피들 회전수 100,000rpm에서의 분포는 80,000rpm에 비해 표면거칠기의 평균은 양호하지만 분포의 영역은 넓게 나타나고 있다. 하지만 스피들의 회전수가 120,000rpm인 경우에는 평균값과 분포범위가 작게 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 고속의 회전은 가공면의 양호한 표면거칠기를

얻을 수 있으며 또한 넓은 가공 영역에서 안정적인 절삭이 수행됨을 알 수 있다. 이를 통하여 고속의 회전은 절삭깊이와 이송의 변화를 통해 회전 당 소재 제거율을 높여 생산성의 향상에 기여할 수 있음을 보여주고 있다.



[그림 4] 회전수 120,000rpm에서 절삭깊이와 이송속도에 따른 표면거칠기



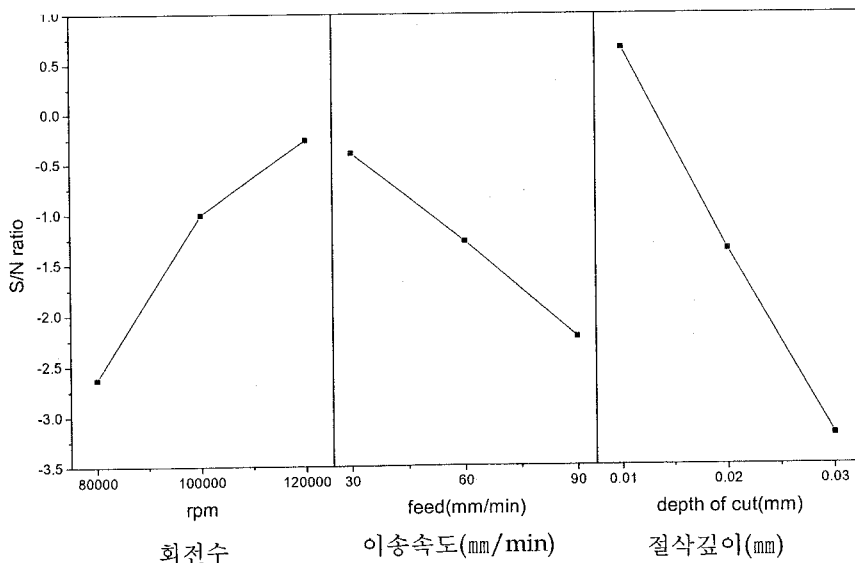
[그림 5] 가공면의 표면거칠기에서 회전수 효과

<표 5>는 일원배치에 의한 분산분석(Ullmam, N. R., 1989)의 결과를 나타낸 것으로 각 가공인자 중에서 어느 특정한 하나의 인자만의 영향을 조사하기 위해 각 인자에 대한 검정을 한 결과이다. 여기에서, S는 요인에 대한 제곱합, ϕ 는 자유도, V는 평균제곱을 의미하며, F0는 평균제곱의 비로서 요인에 대한 평균제곱과 에러에 대한 평균제곱의 비를 의미한다. 검정결과를 보면 요인에 대한 제곱합이 가장 크게 나타나는 절삭 깊이가 표면거칠기에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 두 번째로 영향을 미치는 인자는 스피들의 회전수, 이송속도 순으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

[그림 6]은 다구찌 기법의 망소특성에 의해 각 가공인자의 조건에 따른 S/N비를 나타낸 것이다. 표면거칠기는 절삭 깊이, 스피들의 회전수, 이송속도의 순으로 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 절삭 깊이는 적을수록, 스피들의 회전수는 높을수록, 이송속도는 빠를수록 표면거칠기는 양호해짐을 알 수 있다.

<표 5> 분산분석표

인 자	S	ϕ	V	F ₀
회 전 수	0.5704	2	0.2852	7.75
절 삭 깊 이	1.9542	2	0.9771	26.55
이 송	0.4466	2	0.2233	6.07
오 차	0.2945	8	0.0368	
합 계	3.2657	14		



[그림 6] 가공인자에 따른 S/N ratio

V. 결 론

본 연구를 통해 직경 0.2mm의 평 엔드밀을 이용하여 스테인리스 강(STS 304)의 표면에 슬롯가공을 실시한 후, 바닥면의 표면거칠기를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 마이크로 엔드밀의 가공에 있어서 주축의 회전수가 증가할수록 이송속도 및 절삭깊이를 일정하게 증가시켜야 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
- (2) 마이크로 엔드밀에 의한 가공시 회전당 소거제거율을 증가시킬 때 절삭깊이 보다는 이송속도를 증가시키는 것이 더 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
- (3) 마이크로 엔드밀의 가공에 있어서 가공조건에 대한 분산분석을 통해 통계적 분석이 가능하였다.
- (4) 마이크로 엔드밀 가공에서 가공인자는 절삭깊이, 회전수, 이송속도 순으로 표면거칠기에 영향을 미친다.

■ 참고문헌 ■

- 박성현(1990). 대구찌 방법을 중심으로 한 응용 실험 계획법. 영지출판사. 125~223.
- 박성현(2002). 현대 실험 계획법. 민영사. 67~109.
- 이춘만 외 4(2003). SKD11 금형강의 고속가공에서 가공조건 선정. 한국정밀공학회 지, 20(8), 30-38.
- Dewes, R. C., Apinwall, D. K(1995). High speed Macnining cutting tools, machine requirement. Proceedings of the 31st Int. Matador Conf. Manchester, UK. 455~461.
- J.K. Park, C.M. Lee, D.W. Lee(2004). Mechanical Machining Methods of Micro/Nano Grooves on Brittle Materials. *Machine Engineering*, 4(1-2), 228~234.
- Nakamura, S(1996). high-speed spindles for macnine tools. *International Journal of Japan Society Precision Engineering*. 30(4), 291~294.
- Ullmam, N. R(1989). The analysis of means for signal and noise. *Journal of Quality Technology*, Vol. 21, 111~127.

< Abstract >

**Machining characteristics of micro end-mill
using high revolution**

Kisoo, Kim* · Sangjin, Kim** · Byoungmoo, Cho*** · Hyeungchul, Kim****

Recently, the micro end-milling processing is demanded the high-precise technique with good surface roughness and rapid time in milli-structure parts, micro machine parts and molding industry. The cutting conditions of micro end-milling has an effect on surface roughness of cutting surface. Therefore this study was carried out to cut stainless steel using high revolution air bearing spindle and micro end-mill and analyze the cutting condition to get the optimum surface roughness by design of experiment.

From this study, surface roughness have an much effect according to priority on depth of cut, revolution of spindle and feed.

Key words : **Micro end-mill, Surface roughness, Design of experiment, Analysis of variance**

* Correspondence, Chungnam National University

** BK21 Mechatronics Group., Chungnam National University

*** Graduate of Chungnam National University

**** Chungbuk Provincial College of Science & Technology