韓國精密工學會 2005 年度 秋季學術大會論文集

초고속 스핀들에 의한 마이크로 엔드밀링의 가공특성에 관한 연구

권동희*(부산대학교 대학원 정밀기계공학과), 강익수(부산대학교 대학원 정밀기계공학과),
김전하, 강명창(부산대학교 ERC/NSDM), 김정석(부산대학교 기계공학부)

A Study on the Machining Characteristics for Micro Endmilling by using Ultrahigh-Speed Air Turbine Spindle

D. H. Kwon(Department of Mechanical and Precision Eng., PNU), I. S. Kang(Precision Mech. Eng. Dept., PNU),
J. H. Kim, M. C. Kang(ERC/NSDM, PNU), J. S. Kim(School of Mech. Eng., PNU)

ABSTRACT

Recently, the advanced industries using micro parts are rapidly growing. The appearance of ultra-precision feed mechanism and the development of control system make it possible to process parts in sub millimeter scale by mechanical methods. Micro endmilling is one of the prominent technology that has wide spectrum of application field ranging from macro parts to micro products. So, micro stairs have been trying to cut by using high revolution air turbine spindle and micro-endmill, and studying for magnitude of cutting force. This investigation deals removal characteristics of burr generated by micro endmilling process. Also, decreasing of burr is significant problem in making smooth and precise parts in micro endmilling. In micro endmilling, the material removal rate(MRR) and cutting forces are very small. This paper presents an investigation on the machining characteristics for micro stairs by using ultrahigh-speed air turbine spindle in machining.

Key Words : Micro endmilling (마이크로 엔드밀링), Cutting force (절삭력), Burr (버), Material removal rate (소재 제거율), Air turbine spindle (에어터빈 스핀들)

1. 서론

최근 기계부품의 초소형화·미세화가 진행되면서 마이크로 부품에 대한 가공이 매우 중요하게 대두되고 있다. 첨단산업 제품들에는 초소형 또는 미세형상 구조물을 가진 기능성 마이크로 부품들이 필수적으로 사용되며, 그 용도가 급속하게 증가하고 있다.[1-3]

마이크로 부품을 위한 몰드의 경우, 미세계단을 가진 몰드를 제작하기 위해서는 LIGA(LIthographie, Galvanoformung, Abformung)의 전주공정이 있으나 비용적인 면에서 실용적이지 못하며 와이어 방전가공(Wire EDM) 또한 그 형상 및 표면거칠기 측면에서 불리한 공정들이다. 따라서 최근에는 마이크로 부품의 가공에 적용 가능한 기계적 절삭가공법의 개발 및 마이크로 공구에 초점이 모아지고 있다.[4-6]

마이크로 엔드밀을 사용하여 가공을 할 경우, 일반적인 고속 CNC 밀링의 회전수인 20,000rpm 내에서 사용하면 작은 직경으로 인한 주 절삭속도가 현저히 저하하게 되어 엔드밀의 파손, 절삭면의 품질저하, 가공의 속도가 매우 느려져 제품의 가공시간이 늘어나는 단점을 가지고 있다. 또한, 미세형상의 고속가공은 직경이 큰 엔드밀의 날 끝만을 사용하여 연구되어 오고 있는 실정이다.[7] 이 결과들을 가지고 마이크로 엔드밀에 의한 가공에 적용시키기는 어려운 점들이 많이 있다.

따라서 본 실험에서는 고속 머시닝센터의 주축에 부착이 가능한 초정밀·초고속 에어터빈 스핀들(Air Turbine Spindle)을 사용하여 마이크로 엔드밀링을 통한 미세계단 가공시 절삭력의 특성, 버(Burr)의 형상 및 발생량 그리고 가공면의 품위를 관찰하였다. 초고속 에어터빈 스핀들의 성능평가에서는

각각의 회전속도에 따른 진동특성을 분석하였고, 또한 에어(Air)공급이 가장 안정적인 조건산정으로 회전안정화를 실현하였다.

본 연구에서는 마이크로 절삭가공기술의 확보를 목적으로 초고속회전의 초정밀 에어터빈 스핀들을 사용하여 직경 200㎛ 마이크로 초경 평 엔드밀을 이용한 절삭가공을 실시하고, 미세계단 절삭가공시 절삭속도와 이송속도 및 절삭깊이에 따른 절삭력의 크기, 변화특성, 가공면의 형상 및 표면거칠기의 특성에 관한 연구를 하였다. 그리고 발생된 버는 반드시 제거되어야 하며 가능하면 버의 발생이 방지되거나 허용 가능한 최소한의 크기로 생성되도록 가공조건을 선정하는 것이 바람직하므로, 각각의 가공조건에 따른 버 발생량 분석시 버 발생이 감소되는 경향에 대해서도 고찰하였다.

2. 초고속 에어터빈 스핀들의 성능 평가

2.1 공압특성

BIG DAISHOWA SEIKI CO., LTD.의 에어터빈 스핀들은 최대회전수 80,000rpm이고, NSK NAKANISHI INC.의 에어터빈 스핀들은 최대회전수 150,000rpm이며, 스핀들의 회전정밀도는 1㎛이하이다. 초고속 에어터빈 스핀들의 성능평가에서 각각의 회전속도에 따른 공압이 가장 안정적인 조건을 산정하였다.

실험은 광학 회전속도계(Optical tachometer)로 각각의 공압에 따라 1분간 회전수를 측정하였고, 측정거리는 10mm 로 하였다. 그 결과, 공압이 가장 안정적인 구간은 BIG사와 NSK사 각각 0.25~0.6MPa 과 0.3~0.55MPa 로 나타났다. 오차율은 BIG사는 최소 –2.31% ~ 최대 –8.03%, NSK 사는 최소 –6.11% ~ 최대 –14.04%로 나타났다.

Fig. 1 은 에어터빈 스핀들의 공압특성에 대해서 나타내었다.

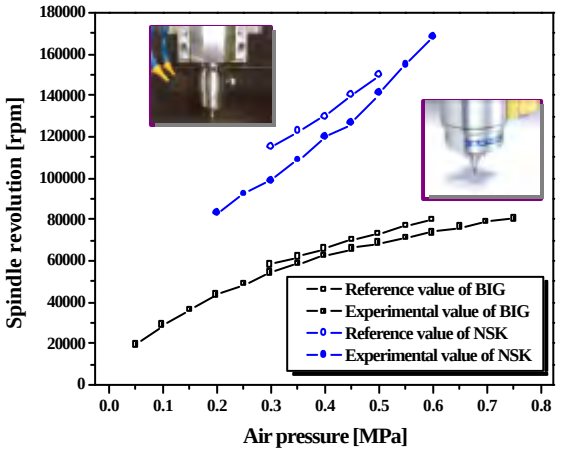

Fig. 1 Pneumatic characteristics for air turbine spindle

2.2 진동특성

본 연구에서는 다양한 가공조건에 가속도 신호들로부터 조건별 경향을 파악하였다. 또한 가속도 센서(B&K Response Freq.: 15㎑)는 가공물에 제한적이지 않고, 가공시 간섭이 없으므로 차후 에어터빈 스핀들에 장착하여 공구, 공작물, 가공기의 상태를 감시할 수 있는 시스템 구축을 위해 필수적일 것이다. 따라서 에어터빈 스핀들의 성능실험 평가에서는 가공시 스핀들의 상태가 공구상태에 가장 큰 영향을 미치므로 스핀들 하우징(Housing)에 X, Y축으로 가속도계를 장착하였다.

Fig. 2는 BIG DAISHOWA SEIKI CO., LTD. 에어터빈 스핀들의 진동특성을 나타내었고, Fig. 3 은 NSK NAKANISHI INC. 에어터빈 스핀들의 진동특성을 나타내었다.

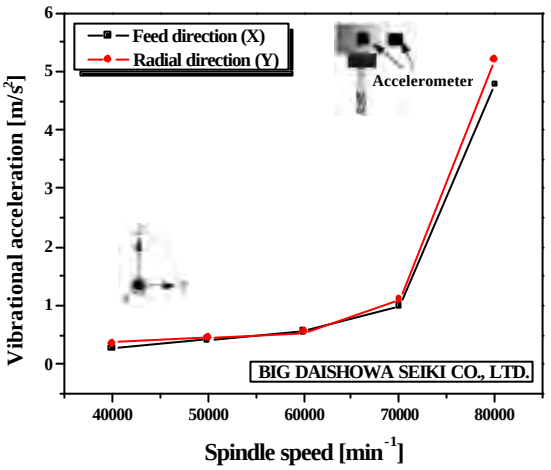

Fig. 2 Vibration characteristics according to spindle speed of BIG

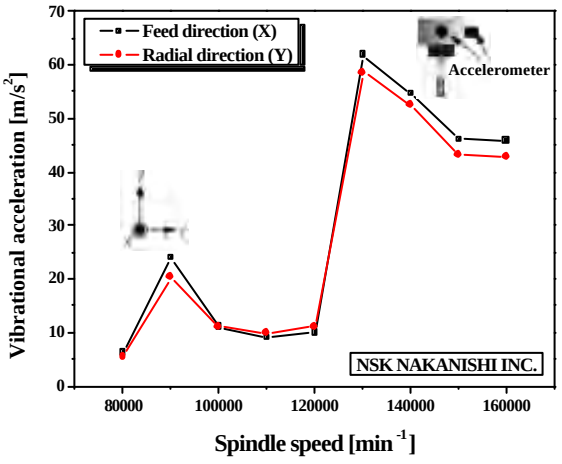

Fig. 3 Vibration characteristics according to spindle speed of NSK

각각의 스핀들 회전수에 따른 진동을 검출한 결과, 스핀들 회전수가 증가할수록 BIG사의 진동가속도는 고차함수적으로 증가하였으나, NSK사의 진동가속도는 이송방향 진동가속도가 더 크게 증가하고 있으며, 90,000rpm과 130,000rpm 부근에서 피크(Peak)를 나타내고있다. 이것은 방향에 따라 스핀들 진동패턴이 다름을 보이는 것이다.

공회전시 스핀들 회전수에 따른 가속도 특성에서 BIG사의 에어터빈 스핀들은 안정구간 40,000~70,000rpm을 선정하였고, NSK사의 에어터빈 스핀들은 100,000~120,000rpm과 140,000~160,000rpm을 안정구간으로 선정하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장비 및 장치 구성

미세계단을 가공하기 위해서 에어터빈 스핀들에 플랫타입(Flat type)의 엔드밀을 장착하였고, 가공실험은 고속가공기(MAKINO V55)의 주축에 에어터빈 스핀들을 장착시켜 사용하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 마이크로 엔드밀의 형상을 나타내었다.

전체적인 실험장치도의 구성은 Fig. 5에 나타내었고, 실험에 사용된 장비와 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 4 Tungsten carbide micro flat endmill

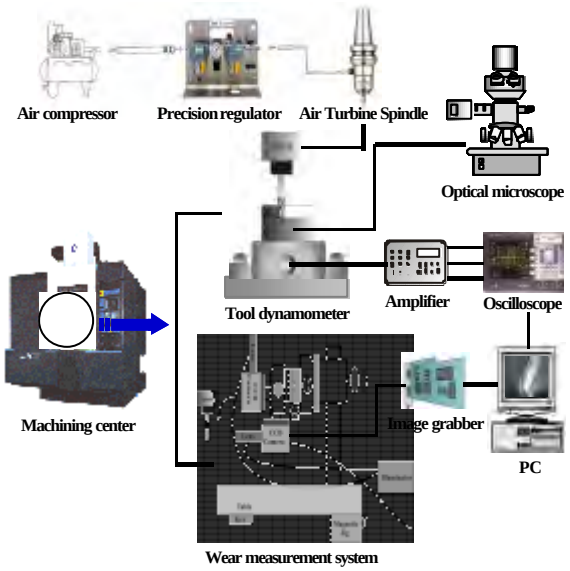

Fig. 5 Experimental setup for characteristics evaluation

Table 1 Specifications of experimental instruments

Instrument	Specification
Machining Center	MAKINO V-55
Air Turbine Spindle (BIG DAISHOWA SEIKI CO., LTD.)	80,000min^{-1} (0.6MPa)
Air Turbine Spindle (NSK NAKANISHI INC.)	150,000min^{-1} (0.5MPa)
Micro Endmill	2-Flutes Flat Endmill, Ø0.2mm (TiAlN-coated Tool)
Tool Dynamometer	9257B (Kistler)
Amplifier	5019A (Kistler)
Digital Oscilloscope	12bit 400 ㎒
CCD Camera	Neocom(x150) / PULNIX(x150)
Optical Microscope	Olympus (x200, 400,800, 2000)
Workpiece	Al7075

3.2 실험방법 및 내용

본 실험에 사용된 공구는 직경 200㎛인 2날 초경평 엔드밀을 사용했고, 가공소재의 재질은 Al7075를 사용하였다.

스핀들의 회전수는 매우 고속이므로 짧은 거리의 가공도 실제 공구는 많은 절삭횟수를 가지므로 마멸에 의한 영향을 받기 쉽다. 따라서 각각의 패스마다 공구의 마멸과 파손을 공구의 착탈없이 기상계측이 가능한 CCD 카메라와 전용지그를 이용한 공구마멸 측정시스템에서 측정하는 방법을 사용하였다. Fig. 6은 마이크로 엔드밀에 의한 미세계단의 가공방법을 모델링하여 나타내었고, 가공조건은 Table 2에 나타내었다.

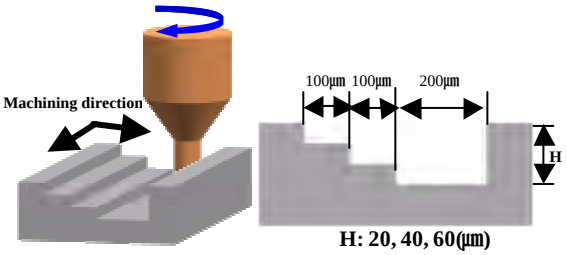

Fig. 6 Schematic of micro endmilling for micro stairs

Table 2 Machining conditions of experiment

	Spindle speed [rpm]	50,000 100,000 150,000
Al7075	Feed rate [mm/sec]	1, 3, 5
	Depth of cut [㎛]	20, 40, 60
	Cutting fluid	Dry cutting

모든 가공실험은 공구마멸의 영향을 최소화하기 위해 매 실험마다 공구를 교환하였으며, 건식 절삭 방법으로 수행하였다.[8]

가공된 시편은 광학현미경을 이용하여 표면을 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미세계단 가공시 절삭력 분석

일반적으로 기계가공시 발생되는 버의 크기에 대한 사실로는 정량적인 모델로부터 절삭저항이 클수록 버의 크기가 커진다는 사실을 알 수 있으며 절삭저항을 크게 하는 모든 요소는 버의 크기를 증가시킨다. 그러므로 버의 크기를 작게 하기 위해서는 최종공정에 의한 절삭깊이의 감소와 공구 경사각의 증가 또는 공구반경의 감소를 들 수 있으며, 이와 같은 방법들은 절삭력을 감소시켜 버의 크기를 작게 하는데 직접적인 원인으로 작용한다.

Fig. 7은 가공시 가공조건에 따른 절삭력으로 버의 형상 및 발생량에 의한 상관관계를 분석하기 위해서 절삭력을 검출한 것이다.

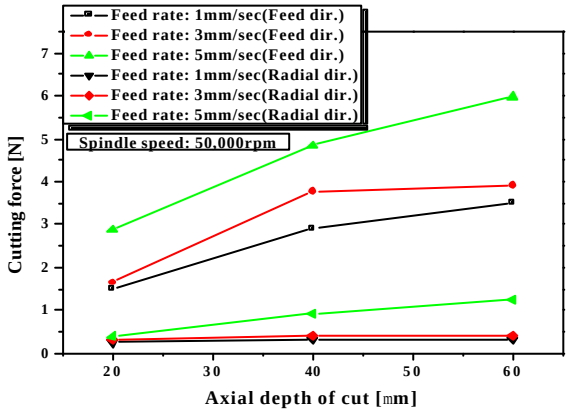

Fig. 7(a) Cutting force in accordance with axial depth of cut to 50,000rpm

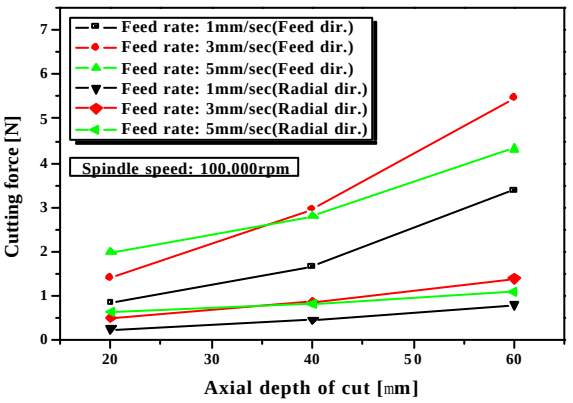

Fig. 7(b) Cutting force in accordance with axial depth of cut to 100,000rpm

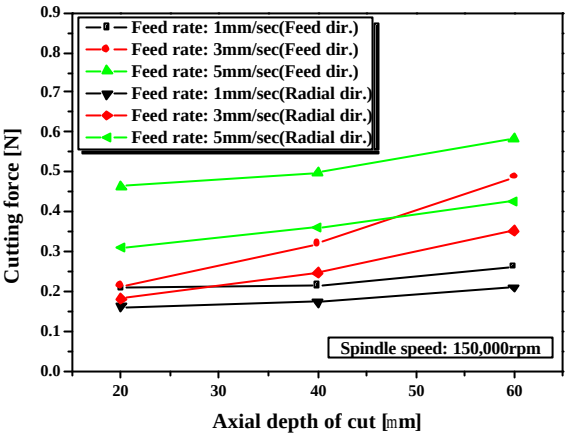

Fig. 7(c) Cutting force in accordance with axial depth of cut to 150,000rpm

절삭력은 공구의 진행방향인 X-방향(이송방향: Fx)과 공구의 회전방향인 Y-방향(반경방향: Fy)에 대해 검출하였으며 가공시 발생되는 절삭력의 크기가 다소 미소하지만 일반적인 가공현상에서 알 수 있듯이 절삭깊이와 이송속도가 작을수록 Fx 와 Fy 가 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 또한 Fig. 7(a) 스핀들 회전수 50,000rpm인 경우, 절삭깊이 60㎛, 이송속도 5mm/sec일 때 절삭력이 급격히 상승하는 경향을 보였다. 이것은 이 조건에서 과도한 절삭에 의한 엔드밀의 불안정한 영향에 따른 것으로 판단된다. 그리고 절삭력 측면에서는 이송속도 보다는 절삭깊이의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 7(b) 스핀들 회전수 100,000rpm은 50,000rpm과 비교에서, 회전당 이송량이 같은 경우 발생하는 절삭력의 크기는 절삭속도와는 무관하게 나타난다. 그러나 절삭속도가 높아지면 더 높은 회전수를 갖는 구간에서도 절삭력이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 스핀들의 고속회전에 기인하여 공구의 강성이 증가되어 안정적인 절삭을 이루는 구간이 더 넓어짐을 알 수 있다. 그리고 절삭력 측면에서는 이송속도 보다는 절삭깊이의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 7(c) 스핀들 회전수 150,000rpm 에서는 절삭력이 매우 작게 나타났다. 이는 날 당 소재 제거율이 적으므로 절삭구간에서 공구에 의한 소성변형이 일어났을 것으로 추정된다. 그리고 절삭력 측면에서는 절삭깊이 보다는 이송속도의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

4.2 가공면의 형상 및 버 관찰

Fig. 8 은 가공조건에 의해 가공되어진 미세계단을 나타내고 있으며 이때 발생되어진 버의 형상을 관찰한 것이다.

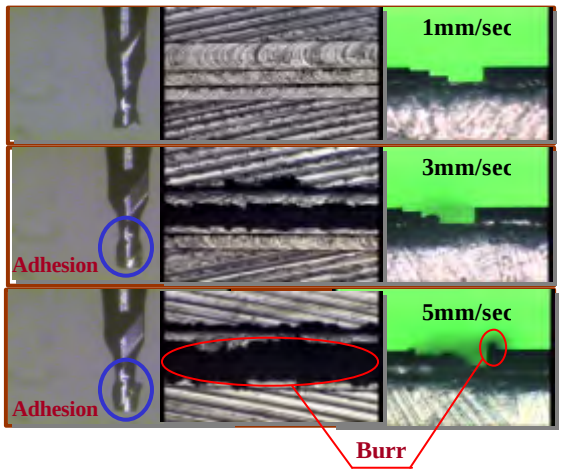

Fig. 8(a) Machining surface and burr shapes in accordance with machining conditions to 50,000rpm

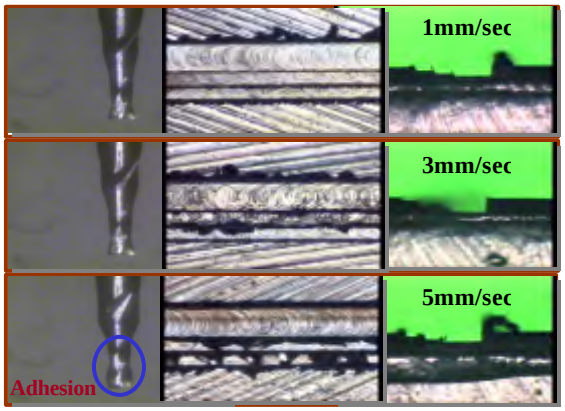

Fig. 8(b) Machining surface and burr shapes in accordance with machining conditions to 100,000rpm

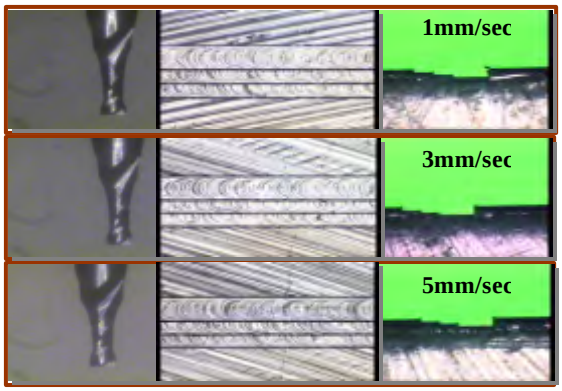

Fig. 8(c) Machining surface and burr shapes in accordance with machining conditions to 150,000rpm

버의 발생량과 크기에 있어서는 절삭깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였으며 이 원인은 절삭력 증가에 따른 일반적인 사항이라 판단된다. 따라서, 버의 발생을 최소화하기 위해서는 가공조건에서 절삭깊이를 줄이는 것도 하나의 바람직한 방법이라 사료된다.

이송속도에 의한 버의 발생비율에 대해서는 절삭깊이에 따라 다소 차이는 보이지만, Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이 가공조건에 따른 적절한 이송속도는 버의 발생을 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8(a)는 가공조건 변화에 따른 절삭가공에서 이송속도의 증가로 공구마멸, 응착 및 버가 급속히 발생하고 있다. 이는 엔드밀의 직경이 매우 작아 피삭재를 제거시키기 위한 주 절삭속도가 작기 때문에 이 구간에서는 전단변형의 완전한 절삭이 이루어지지 않고, 엔드밀에 의한 가공부의 소성변형이 주를 이루는 것으로 판단된다. 이런 현상은 가공속도가 더 빠른 100,000rpm이나 150,000rpm에서는 거의 나타나지 않는다.

Fig. 8(b)는 절삭속도에 비해 절입량이 많은 경우를 나타내고 있다. 이 경우는 과다한 절삭으로 인해 절삭력이 커지게 되고 이에 기인하여 공구의 응착을 유발시킨다. 가공면 역시 버가 발생하고 표면이 거칠게 가공이 되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 8(c)는 절삭가공에서 나타나는 가장 전형적인 절삭력과 가공면을 보여주고 있다. 이것은 초고속으로 갈수록 공구상태, 표면형상 향상 및 버가 감소된다는 것을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로 절삭가공기술의 확보를 목적으로 초고속회전의 초정밀 에어터빈 스핀들을 사용하여 직경 200㎛ 마이크로 초경 평 엔드밀을 이용한 절삭가공을 실시하고, 미세계단 절삭가공시 절삭속도와 이송속도 및 절삭깊이에 따른 절삭력의 크기, 변화특성, 가공면의 형상 및 가공특성에 관해 연구하였다. 그리고 각각의 가공조건에 따른 버 발생량 분석시 버 발생이 감소되는 경향에 대해서도 연구하였으며, 실험을 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) BIG DAISHOWA SEIKI CO., LTD.와 NSK NAKANISHI INC.의 에어터빈 스핀들에 대한 적정 공압조건 산정으로 회전안정화를 실현하였고, 진동특성 실험을 통해 에어터빈 스핀들의 안정구간을 선정하였다.

(2) 50,000rpm에서는 엔드밀의 직경이 매우 작아 피삭재를 제거시키기 위한 주 절삭속도가 작기 때문에 이 구간에서는 전단변형의 완전한 절삭이 이루어지지 않고, 엔드밀에 의한 가공부의 소성변형이 일어나서 공구의 응착 및 버가 급속히 발생하였

다.

(3) 초고속 100,000rpm 가공에서는 과도한 이송량으로 인해 공구에 응착이 발생하였으나 파손되지 않고 오히려 공구의 강성을 향상시키는 효과를 보였다.

(4) 스핀들 회전수가 150,000rpm 초고속으로 증가함에 따라 절삭력, 버 및 공구의 응착이 감소하고, 표면형상이 향상되었다.

(5) 절삭력 크기는 이송속도에 비례하여 증가하고 회전당 절삭량이 같은 경우는 절삭속도에 무관하나, 회전수가 높아지면 공구강성의 증가에 따른 가공가능 이송속도의 영역이 증가된다.

참고문헌

1. Takamori, T., "Actuator technology in millimachine," JSPE, Vol. 60, No. 3, pp. 333 - 338, 1994.
2. Benavides, G. L., Yang, P., and Adams, D. P., "Micro/Meso mechanical," NSF workshop, Northwestern University, May 2000
3. Ehman, K. F., Devor, R. E., Kapoor, S. G., and Ni, J., "Micro/Meso mechanical," NSF workshop, Northwestern University, May 2000
4. Prickett, P. W., "An overview of approaches to end milling tool monitoring," International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol. 39, pp. 105 - 122, 1999.
5. Bao, W. Y., Tansel, I. N., "Modeling micro-end-milling operation. Part Ⅰ: analytical cutting force model," Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 40, pp. 2155 - 2173, 2000.
6. Tansel, I. N., Arkan, T. T., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D., and McCool, M., "Tool wear estimation in micro-machining. Part Ⅰ: tool usage-cutting force relationship," Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 40, pp. 599 - 608, 2000.
7. Park, J. K., Lee, C. M., and Lee, D. W., "Mechanical Machining Methods of Micro/Nano Grooves on Brittle Materials," Machine Engineering, Vol. 4, No. 1-2, pp. 228 - 234, 2004.
8. Tansel, I., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E., Li, W., "Micro-end-milling-I. Wear and breakage," Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 38, pp. 1419 - 1436, 1998.