한국공작기계학회논문집 Vol.16 No.5 2007. 10.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

마이크로 엔드밀링에서 가공깊이에 따른 가공변질층의 특성

이종환[+], 김정석[*], 권동희[+], 박진효[+], 김병민[+], 정윤호[+], 강명창[++], 이성용[+++]

(논문접수일 2007. 3. 28, 심사완료일 2007. 6. 28)

The Characteristics of Damaged Layer According to Depth of Cut in Micro Endmilling

Jong-Hwan Lee[+], Jeong-Suk Kim*, Dong-Hee Kwon[+], Jin-Hyo Park[+], Byung-Min Kim[+], Yoong-Ho Jung[+], Myung-Chang Kang[++], Seong-Yong Lee[+++]

Abstract

The study on damaged layer is necessary for machinability improvement in micro machining. The damaged layer in metal cutting is derived from plastic deformation and transformation of metal structure. The damaged layer affects micro mold life and micro machine parts. In this study, the damaged layer of micro machined surface of copper is evaluated according to various machining condition. The damaged layer structure and metallurgical characteristics are measured by optical microscope, and evaluated by cutting forces and surface roughness. The scale of this damaged layer depends on cutting process parameters and machining environments. By experimental results, depth of damaged layer was increased with increasing of cutting depth, also the damaged layer is less occurred in down-milling compared to up-milling during micro endmilling operation.

Key Words : Micro Endmilling(마이크로 엔드밀링), Damaged Layer(변질층), Machining Condition(가공조건), Burr(버), Ultrahigh-Speed Air Turbine Spindle(초고속 에어터빈 스핀들)

1. 서 론

고경도 고정밀도의 마이크로 부품은 가공시에 발생된 가공변질층(Damaged layer)으로 인하여 경도 및 강도와 내마멸성이 감소하고 잔류응력(Residual stress)이 발생하여 장시간 사용할 때 각종 트러블을 야기시킨다.

+ 부산대학교 대학원 기계공학부
* 교신저자, 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구소 (juskim@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
++ 부산대학교 하이브리드소재 솔루션 국가핵심연구센터(NCRC)
+++ 한국폴리텍VII 부산대학 컴퓨터응용기계과

가공변질층은 금속재료를 기계가공 했을 때 그 표면 혹은 표면으로부터 어느 깊이까지의 표층부에 나타나는 모재와 다른 성질을 가진 변질된 층이다. 가공변질층은 오염, 흡착층(물리흡착, 화학흡착), 화합물층, 이물질의 혼입 등 외적 요소에 의한 변질과 미세결정층, 전위(Dislocation) 밀도의 상승, 쌍정(Twin)의 생성, 섬유조직, 연마변태, 가공에 의한 결정의 변형, 마찰열에 의한 재결정 조직변화에 의한 변질, 그리고 잔류응력층 등 내적 요소에 의한 변질로 나눌 수 있다[1-4].

절삭가공시 재료의 표면층으로부터 모재 사이에서 발생하는 변질층은 공구 또는 가공물의 속도 및 이송의 영향을 받게 된다. 특히, 피삭재와 공구가 직접 접촉하는 기계가공에 있어서 가공에 의한 변질이 현저하며, 가공 접촉부는 가공물의 표면에서 내부로 열이 이동되고 내부에 일정한 온도 구배를 만들며, 여기에 잔류응력이 발생한다. 지금까지의 연구는 선삭 및 연삭, 방전가공면에 발생하는 변질층의 연구가 많이 진행되어 왔다[5-9]. 그러나 엔드밀 가공에서는 상대적으로 낮은 절삭력과 절삭온도로 인하여 변질층의 발생정도가 적기 때문에 측정상 난점이 많아 연구의 큰 진전을 보지 못하고 있다. 또한 마이크로 엔드밀링(Endmilling)의 가공특성 평가에 있어서 거시적 정밀도에 관한 연구는 많이 수행되었으나 미시적 정밀도에 관련된 연구는 아직 부족한 실정이다[10-12].

본 연구에서는 마이크로 가공시 발생되는 가공변질층의 영향을 최소화 하기위해서 초고속 에어터빈 스핀들(Ultrahigh-speed air turbine spindle)을 이용하여 마이크로 초경 평 엔드밀(Flat endmill)로 절삭가공을 수행하였다. 초고속 에어터빈 스핀들의 성능은 각각의 회전속도에 따른 진동특성을 분석하였고, 또한 에어공급이 가장 안정적인 조건선정으로 회전안정화를 구현하였다. 마이크로 가공시스템을 이용하여 구리(Copper) 마이크로 엔드밀링의 가공특성 및 표면 변질층을 가공조건에 따라 평가하였다. 그리고 마이크로 가공의 절삭력 획득 및 분석을 위하여 자체 개발한 마이크로 공구동력계를 이용하여 미세절삭력을 신뢰성 있게 평가하였다[13]. 가공변질층은 광학현미경(Optical microscope)으로 그 특성을 평가하였고, 변질층의 크기가 절삭공정 파라미터와 가공환경에 의존하는 것을 제시하고자 한다. 이러한 실험을 통해 초고속 에어터빈 스핀들을 이용한 미세가공의 산업 적용성을 미시적 정밀도 측면에서 평가하고자 한다.

2. 초고속 에어터빈 스핀들의 동적특성

본 실험에 사용한 초고속 에어터빈 스핀들은 최대회전수 160,000rpm이고, 스핀들의 회전정밀도는 1㎛이하의 값을 갖고 있다. 스핀들의 공압특성 평가에서는 각각의 회전속도에 따른 공압이 안정적인 조건을 선정하였다. 실험은 지그를 이용한 광학 회전속도계(Tachometer)로 각각의 공압에 따라 1분간 스핀들의 회전수를 측정하였고, 측정거리는 10mm로 하였다. 또한 측정오차를 고려하여 각 조건마다 10회씩 측정한 후 평균값을 나타내었다.

본 실험을 통해 초고속 에어터빈 스핀들에 대한 적정 공압조건(0.30~0.55MPa)을 선정하였고, 이로 인해서 회전안정화를 실현할 수 있었다. 또한, 초고속 에어터빈 스핀들의 동특성 실험을 위해서 진동특성을 잘 반영할 수 있는 진동 가속도계(Accelerometer, B&K Response Freq. : 15kHz)와 증폭기(Amp. : B&K NEXUS 4374S-4ch) 를 이용하였다.

가공시 주축의 상태가 공구상태에 가장 큰 영향을 미치므로 스핀들 하우징에 이송방향과 반경방향으로 가속도계를 부착하여 가속도 신호를 획득하였고, 스핀들 속도에 따른 진동 가속도 신호를 검출한 결과, 이송방향 진동 가속도가 반경방향의 값 보다 더 크게 증가하고 있으며, 120,000rpm과 130,000rpm 부근에서 피크(Peak)를 나타내었다. 이것은 방향에 따라 스핀들의 진동 패턴이 다름을 보이고 있고, 이 영역 대에 공진이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장비 및 장치 구성

본 실험에서는 초고속 에어터빈 스핀들에 플랫타입(Flat type)의 엔드밀을 장착하였고, 가공실험은 고속 머시닝센터(MAKINO V55)의 주축에 스핀들을 부착시켜 사용하였다. 그리고 가공변질층의 깊이를 평가하기 위해 광학 현미경 시스템을 이용하여 변질층을 가시적으로 관찰하였다. 또한 절삭력 측정은 가공중인 공작물을 전용지그에 클램핑(Clamping)하여 측정하는 시스템으로 구성하였다.

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

3.2 마이크로 가공 실험방법 및 내용

마이크로 엔드밀링시 가공조건 변화에 따른 가공특성 및 가공변질층의 특성을 파악하기 위해 구리(Copper) 소재를 블록형상으로 제작하였다. 가공실험은 ∅0.8mm 마이크로 공구로 150m/min 절삭속도 이상의 미세가공을 실현하는 조건을 선정하였다. 즉 에어 스핀들 속도 60,000~160,000rpm으로 각각 20,000rpm씩 증가시키며, 날당이송 변화[14]와 절

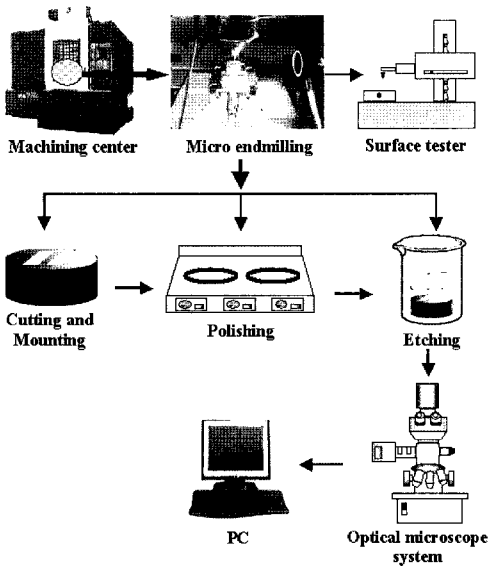


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Specifications of experimental instruments

Instrument	Specification
Machining center	MAKINO V55: Max 20,000rpm, 50m/min
Air spindle	160,000rpm(0.6MPa)
Micro endmill	∅800㎛, 2-flutes flat endmill (TiAlN-coated tool)
CCD camera	Neocom(x1~450) / PULNIX(x150)
Dynamometer	3 Axis, Freq. range: 5~10kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling: 400kHz
Surface tester	Taylor Hobson, Surtronic 3+
Optical microscope system	STM-MJS2 [OLYMPUS]
Workpiece	Cu(Copper)

삭깊이 변화에 따라 가공하였다. 가공시편은 광학 현미경을 통해 변질층의 깊이와 버(Burr) 등을 측정하였다. 또한, 가공 변질층의 특성 실험은 조건에 따라 공구 및 스핀들의 회전 안정화를 고려하여 각각의 가공조건에 따라 시편을 가공한 후, 측정목적에 맞게 가공면을 측정하였고, 마이크로 엔드밀링 실험에 적용된 가공조건은 Table 2와 같다.

시편의 마운팅(Mounting)에 있어서 수지선정을 잘못할

Table 2 Machining conditions of experiment

Copper(Cu)	Spindle speed [rpm]	60,000~160,000 (Step: 20,000)
	Feed per tooth [㎛/tooth]	3, 4, 5, 6
	Cutting depth [㎛]	50, 100, 150, 200
	Cutting fluid	Dry cutting

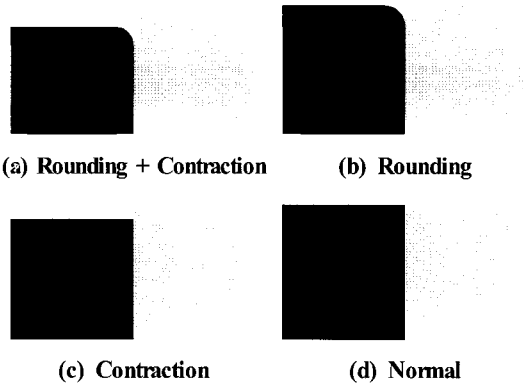


Fig. 2 Improvement of mounting

경우 마운팅 후, 수지의 라운딩(Rounding) 현상과 압축현상에 의해 광학 현미경 상으로 가장자리(Edge)부의 관찰이 용이하지 못하게 된다. Fig. 2 (a)에서는 마운팅을 했을 때 수지의 압축현상 및 라운딩 현상이 일어나는 것을 보여준다. (b)에서는 수지의 압축률은 적으나 시편과의 접촉부에 라운딩이 일어나는 것을 보여주고, (c)에서는 접촉부에 라운딩 현상은 없으나 압축률에 의해 수지와 시편의 단차가 일어나는 것을 보여준다. 이와 같은 현상들은 광학 현미경 상으로 관찰할 때 가장자리부 단차에 의해 가장자리부에서 상이 흐려지는 현상으로 가장자리부 관찰이 용이하지 못한 단점이 있다.

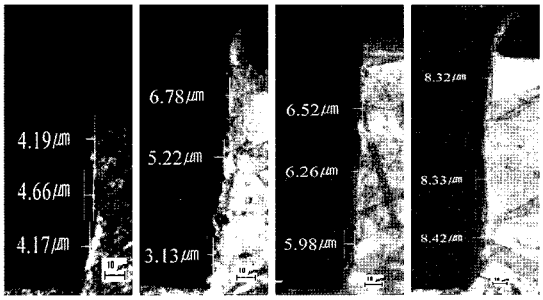
시편 마운팅은 수지와 시편사이의 가장자리부 관찰에 있어 측정난점을 해결하기 위해, Fig. 2 (d)와 같이 수지와 시편에 흡착력이 좋고 경도가 높아 폴리싱(Polishing)을 했을 때 수지의 과폴리싱 현상이 없는 에포멧(Epomet) 수지를 선정하여 마운팅을 수행하였다.

에칭(Etching)은 소재특성에 따라 나이탈(Nital) 6~9%로 하여 약 10여초 동안 부식시켜 조직차이로 가공변질층의 깊이를 측정하였다.

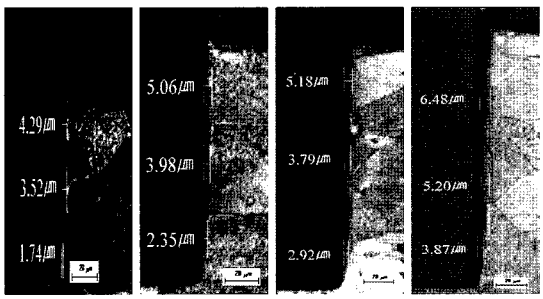
4. 가공변질층의 특성

4.1 가공변질층의 형상 및 크기

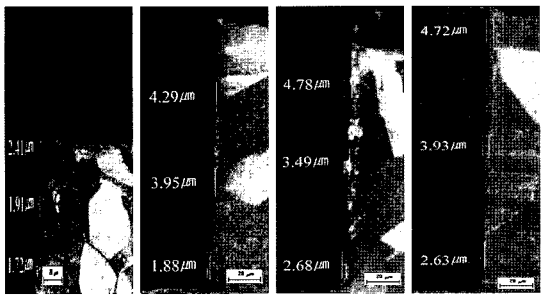
초고속 회전의 마이크로 엔드밀링 가공시 기계적, 열적 영향이 미시적 정밀도에 미치는 상관관계를 알아보기 위해 스핀들 속도변화, 날당이송 그리고 절삭깊이 변화에 따른 가공변질층의 형상 및 깊이를 상향밀링과 하향밀링으로 나누어 평가하였고, 시편의 가공변질층은 부식법을 통하여 광학현미경으로 측정하였다. 그리고 측정오차를 고려하여 각 측면에 발생하는 변질층을 상·중·하 3부분으로 나누어 측정한 후 평균값으로 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4는 상향밀링시 가공변질층의 형상과 깊이를 절삭깊이 변화에 따라 나타내었고, Fig. 5와 Fig. 6은 하향밀링시 가공변질층의 형상과 깊이를 절삭깊이 변화에 따라 나타내었다.



(a) Spindle speed: 60,000rpm, Feed per tooth: 4㎛/tooth



(b) Spindle speed: 120,000rpm, Feed per tooth: 4㎛/tooth



(c) Spindle speed: 160,000rpm, Feed per tooth: 4㎛/tooth

Fig. 3 Depth variation of damaged layer according to machining conditions(up-milling)

가공변질층의 깊이는 Fig. 4의 상향밀링 보다는 Fig. 6의 하향밀링 일 때가 작게 나타났다. 이는 하향밀링이 상향밀링보다 절삭저항 및 압축잔류응력을 적게 받는 것으로 사료된다. 또한 가공된 마이크로 엔드밀링의 측면형상을 보면 상부가 넓고 하부가 좁게 가공되었다. Fig. 3과 Fig. 5에 보이는 바와 같이 상부 가공면에 런아웃(Runout) 오차에 의한 버가 증가하는 동시에 가공변질층 또한 함께 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 안정된 가공과 가공품질의 향상을 위해서는 공구의 런아웃을 개선해야 할 필요가 있다. 스핀들 속도가 증가할수록 가공변질층은 상향밀링과 하향밀링 모두 감소하는 경향이 나타났고, 가공변질층의 특성에서는 초고속일 때 절삭저항이 감소 한다는 것을 알 수 있다. 그리고 절삭깊이가 증가하면 가공변질층의 깊이도 같이 증가하고 있다. 이는 절삭깊이가 증가할 때 절삭저항 또한 증가하는 것으로 사료된다. 그러나 날당이송 변화에서는 날당이송이 증가하면 가공변질층의 깊이는 감소되었다. 이는 날당이송이 증가할 때 미세절삭에서 비절삭 저항은 감소하는 것으로 사료된다[14].

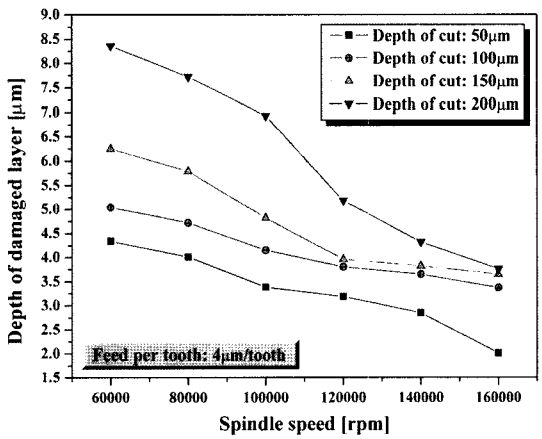
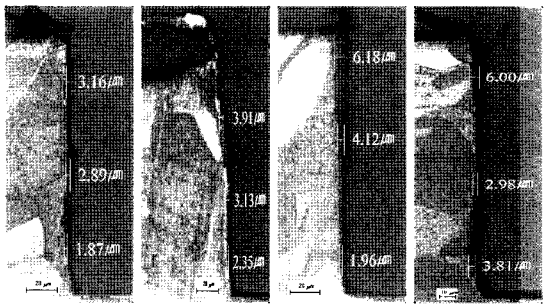
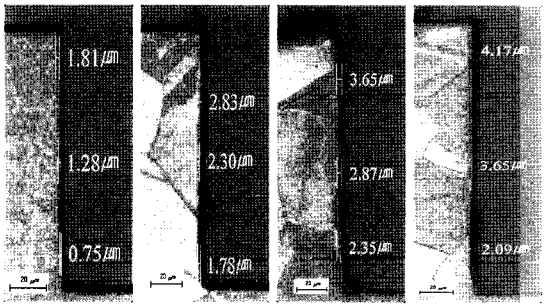


Fig. 4 Relationship between depth of damaged layer and spindle speeds(up-milling)



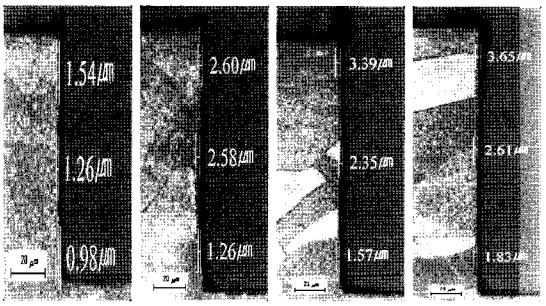
Cutting depth 50㎛ 100㎛ 150㎛ 200㎛

(a) Spindle speed: 60,000rpm, Feed per tooth: 4㎛/tooth



Cutting depth 50㎛ 100㎛ 150㎛ 200㎛

(b) Spindle speed: 120,000rpm, Feed per tooth: 4㎛/tooth



Cutting depth 50㎛ 100㎛ 150㎛ 200㎛

(c) Spindle speed: 160,000rpm, Feed per tooth: 4㎛/tooth

Fig. 5 Depth variation of damaged layer according to machining conditions(down-milling)

4.2 절삭력 특성

초고속 에어터빈 스핀들을 이용한 마이크로 가공에서는 스핀들 속도가 높아서 기존에 낮은 고유진동수의 공구동력계로는 획득하기 어려운 매우 높은 고주파의 절삭력 신호가 발생하게 되어, 이에 적합한 공구동력계가 필요하게 된다.

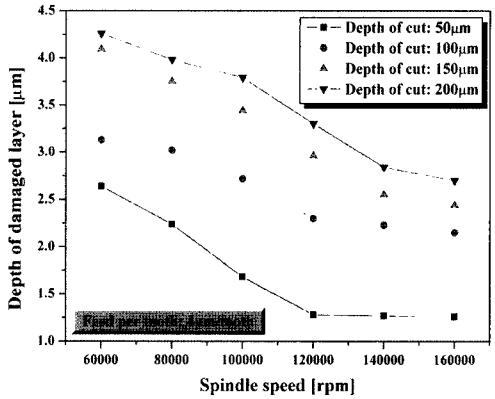


Fig. 6 Relationship between depth of damaged layer and spindle speeds(down-milling)

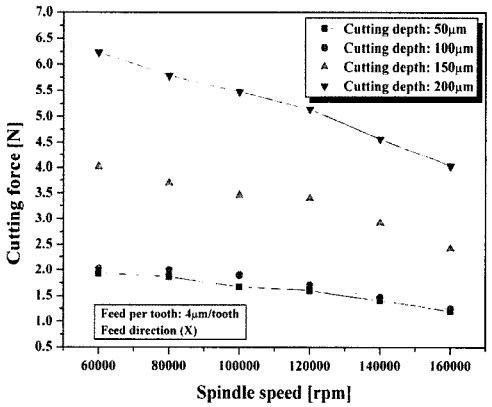


Fig. 7 Relationship between cutting force and spindle speeds(feed direction)

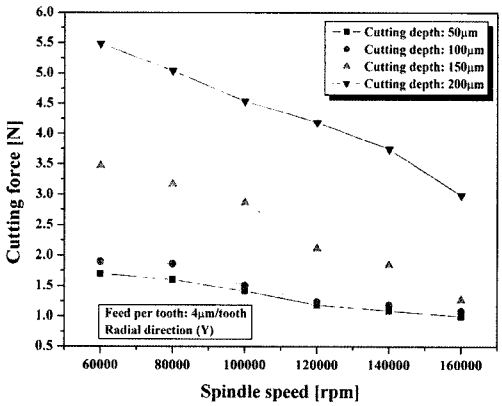


Fig. 8 Relationship between cutting force and spindle speeds(radial direction)

본 실험에서는 최대 회전수 160,000rpm, 2날 평 엔드밀 사용조건에서 최대 주파수는 5.3kHz인데 안정영역에서 절삭력을 획득하기위해 공진 주파수가 10kHz인 공구동력계를 적용하였다. 이송방향의 절삭력과 반경방향의 절삭력 특성은 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 절삭력 특성은 반경방향보다는 이송방향의 절삭력이 더 크게 나타났다. 그리고 절삭깊이가 작은 50, 100㎛에서는 치수효과(Size effect)에 의해 절삭력 변화가 미소하나, 그 외의 경우 절삭력은 일괄적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 초고속으로 갈수록 절삭력은 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 가공변질층과는 밀접한 관련이 없는 것으로 나타났다.

4.3 표면거칠기 특성

가공면의 표면거칠기 측정은 Taylor Hobson 3차원 표면거칠기 측정기를 이용하여 그루브(Groove) 가공면을 3회씩 측정 후, 그 평균값을 중심선 평균거칠기로 나타내었다. Fig. 9는 거시적 정밀도인 표면거칠기를 나타내고 있다. 표면거칠기 특성은 절삭깊이의 증가에 따라 표면거칠기가 급격히 나빠지는 것을 볼 수 있다. 따라서 고품위의 표면거칠기를 얻기 위해서는 공구의 절삭깊이를 줄이거나 회전속도를 더 높여서 날당 제거량을 줄이는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 160,000rpm, 이송속도 4㎛/tooth, 절삭깊이 50㎛에서 약 Ra 185nm(Cut-off length 0.8mm) 정도의 비교적 양호한 표면거칠기를 얻었다. 이러한 가공면의 품위는 거의 연마에 의한 경면가공과 비슷한 수준에 이른다. 일반적으로 표면거칠기를 나타내는 거시적 정밀도와 미시적 정밀도인 가공변질층과의 상관성이 있는 것이 절삭현상이

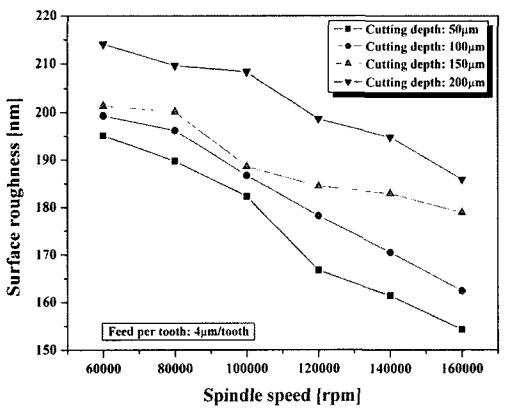


Fig. 9 Relationship between surface roughness and spindle speeds

다. 따라서 본 구리의 마이크로 가공에서도 이러한 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

초고속 에어터빈 스핀들을 이용한 구리의 마이크로 엔드밀링에서 가공변질층에 대한 평가 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스핀들의 회전수가 증가함에 따라 가공변질층은 감소하였고, 동일 조건하에 절삭깊이가 증가함에 따라서는 가공변질층 또한 증가하였다.
(2) 가공변질층은 상향밀링 보다는 하향밀링시에 적게 발생하였고, 절삭깊이가 증가함에 따라 절삭력은 증가하였다.
(3) 가공면의 거시적 정밀도인 표면거칠기와 미시적 정밀도인 가공변질층과는 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.
(4) 초고속 에어터빈 스핀들을 활용한 미세 그루브 가공은 기존 가공기에서 가공변질층을 크게 줄일 수 있는 방법임을 확인하였다.

후 기

이 연구는 부분적으로 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-01001-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) Kwon, D. H., Lee, J. H., Hwang, I. O., Kang, M. C. and Kim, J. S., 2006, "A Study on the Microscopic Precision of Machined Surface according to Variation of Machining Environments in High Speed Endmilling," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 50~57.
(2) Sokovic, M. and Mijanovic, K., 2001, "Ecological Aspects of the Cutting Fluids and its Influence on Quantifiable Parameters of the Cutting Processes," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 181~189.
(3) Matsumoto, Y. and Barash, M. M., 1984, "Residual Stress in the Machined Surface of Hardened Steel

High Speed Machining," *Presented at the Winter Annual Meeting of the ASME*, pp. 193~204.

(4) Jeon, S. K., Shin, Y. J., Kim, B. H., Kim, H. Y. and Jeon, B. H., 2003, "Micro-Machining of Glasses Using Chemical-Assisted Ultrasonic Machining," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 27, No. 12, pp. 2085~2091.

(5) Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Jia, Z. X. and Sun, J. L., 1999, "Material Removal Rate Analysis in the Ultrasonic Machining of Engineering Ceramics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 180~184.

(6) Chu, T. H. and Wallbank, J., 1998, "Determination of the Temperature of a Machined Surface," *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME*, Vol. 120, pp. 259~263.

(7) Kang, J. H., 2000, "Environmentally Conscious Machining Technology and Machine Tool," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 9~19.

(8) Chou, Y. K. and Evans, C. J., 1999, "White Layers and Thermal Modeling of Hard Turned Surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1863~1881.

(9) Mohri, N., Saito, N. and Tsunekawa, Y., 1993, "Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 219~222.

(10) Park, J. and Jeong, H., 2005, "A Study on the Fabrication of Micro Groove on Si Wafer Using Chemical Mechanical Machining," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 11, pp. 2096~2104.

(11) Rahman, M. and Kumar, A. S., 2001, "Experimental Evaluation on the Effect of Minimal Quantities of Lubricant in Milling," *J. of MTM*, Vol. 42, pp. 539~547.

(12) Song, C. S. and Kim, J. H., 2005, "Cutting Characteristics of Dry Turning Using Compressed Air," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 8~14.

(13) Kwon, D. H., Hwang, I. O., Kang, M. C., Kim, J. H., Kim, J. S. and Ahn, J. H., 2006, "Development of the Micro Tool Dynamometer for Micro Machining," *KSPE Spring Annual Meeting*, pp. 217~218.

(14) Lee, J. W., Kwon, D. H., Kim, J. S., Kim, D. W., Kang, M. C. and Lim, B. K., 2007, "Damaged Layer Characteristics in Micro-Endmilling of Copper Using an Ultrahigh-Speed Air Spindle," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 244~250.