

◆ 특집 ◆ 초정밀가공기술

초소경 엔드밀링을 이용한 미세 가공특성 분석 및 응용가공

Analysis of Micro Machining Characteristics using End-milling and Its Applications

최환진¹, 박언석¹, 전은채^{1,2}, 제태진^{1,2}, 최두선^{1,2,✉}
 Hwan-Jin Choi¹, Eun-Suk Park¹, Eun-chae Jeon^{1,2}, Tae-Jin Je^{1,2}, and Doo-Sun Choi^{1,2,✉}

¹ 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스 전공 (Dept. of NanoMechatronics, University of Science and Technology)

² 한국기계연구원 나노공정연구실 (Dept. of NanoManufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials)

✉ Corresponding author: choids@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7124

Manuscript received: 2012.10.16 / Accepted: 2012.10.23

Micro structures which are widely used at various fields are commonly fabricated by lithograph, etching and laser methods. Recently, with the emergence of micro tools and ultra-precision machine tools, fabrication of the micro structures obtained using end-milling are studied. However, there are some problems due to the diameter of the micro end-mill getting smaller below 100 μm . The micro run-out resulted from miniaturization of end-mills have influence seriously on accuracy of micro structures. The error of run-out with a tooling jig showed a decrease of about 9.3 μm . Furthermore, micro structures with width of 30 μm could be applied through experiments of slot machining obtained using 30 and 50 μm end-mill. Also, narrow angle structures with 30° angle could be applied through analysis of machining acute angle structures. Based on basic experiments, micro fluidics channels and spiral patterns for air bearing were machined.

Key Words: Micro End-milling (초소경 엔드밀링), Micro Structures (마이크로 구조물), Tool Setting (공구 장착), Slot Machining (슬롯 가공), Narrow Angle Machining (협각 가공)

1. 서론

표면에 마이크로 형상을 갖는 초소형 구조물 부품들은 첨단산업 제품의 소형화, 경량화로 인해 그 수요가 증가하고 있으며 일반적으로 리소그래피, 애칭, 레이저^{1,3}를 이용한 방법으로 많이 제작된다. 그러나 최근 마이크로 공구와 나노급의 구동 정밀도를 갖는 초정밀 가공기의 발달로, 마이크로 구조물의 기계적인 가공⁴이 가능해졌으며, 대량 생산을 위한 금형, 대면적 구조물 제작에도 응용되고 있는 추세이다. 기계적인 가공법 중에서 엔드밀링을 이용한 가공법⁵⁻¹¹은 특히 복잡한 형상 및

곡면, 3 차원 형상 구조물의 가공에 유리하기 때문에 그 활용 범위가 마이크로 형상 구조물 부품 가공에 확장되어 가고 있다.

그러나 초소경 엔드밀을 이용한 마이크로 구조물 부품 제작을 위해서는 미세 직경 공구의 회전 오차 최소화 및 안정화를 기반으로 한 초소경 엔드밀링 가공기술에 대한 다양한 가공특성의 분석이 필요하다.

본 연구에서는 초소경 엔드밀의 안정적 사용을 위한 공구 세팅 기술을 기반으로 100 μm 이하의 엔드밀링 특성 및 마이크로 예각 구조물의 가공특성을 분석하고 이를 기반으로 다양한 마이크로

형상 구조물의 응용가공 실험을 수행하였다.

2. 공구 회전 오차(Run-out) 최소화를 위한 공구세팅 장치

2.1 회전 오차 저감용 공구세팅 장치

엔드밀링에서 발생하는 공구의 회전오차¹²는 마이크로 구조물 제작에서 가공오차를 발생시키며 정상적인 회전절삭을 방해하여 공구 파손 및 절삭면의 불량을 발생시킨다. 런아웃에 영향을 미치는 내부적인 요인으로 공구의 형상, 기계정밀도를 들 수 있다. 이러한 내부적인 요인이 신뢰할 수 있는 수준이라면 공구 세팅 과정에서 발생하는 외부적인 요인을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서 공구 세팅 장치를 제작하여 런아웃을 최소화하고자 하였다.

Fig. 1 같이 공구의 세팅에서 발생하는 런아웃은 너트와 콜릿, 엔드밀의 회전축의 오차에 의해 발생한다. 너트와 엔드밀의 축이 틀어지는 것을 방지하기 위하여 너트의 외면과 엔드밀의 외면이 동일 동심을 이루게 해주는 공구세팅 장치를 제작하였다.

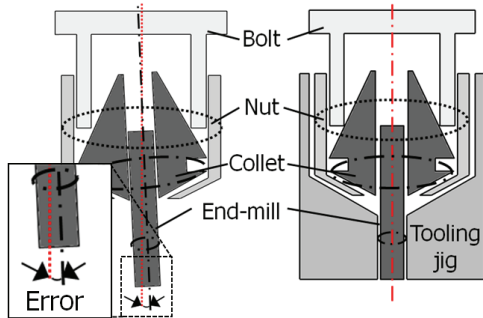


Fig. 1 Error of run-out and the tooling jig

2.2 공구세팅 장치의 효과 분석

Fig. 2는 $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 인디게이터를 이용하여 공구세팅 장치 사용 전후의 런아웃을 10회 측정된 결과를 나타낸 것이다. 공구세팅 장치 사용 전의 런아웃을 측정한 결과 최대 $25 \mu\text{m}$ 의 오차가 발생하였으며 평균적으로 $14.4 \mu\text{m}$ 의 런아웃이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해 공구세팅 장치를 이용하였을 때는 런아웃 측정결과 최대 $10 \mu\text{m}$ 의 런아웃이 발생하였으며 평균적으로 $5.1 \mu\text{m}$ 의 런아웃을 확인하였고 최소 $2 \mu\text{m}$ 이하로

세팅이 가능하였다. 따라서 초소경의 마이크로 엔드밀을 사용할 경우에는 공구세팅 장치를 이용하는 것이 런아웃 오차를 줄이는데 효과가 있음을 확인하였다.

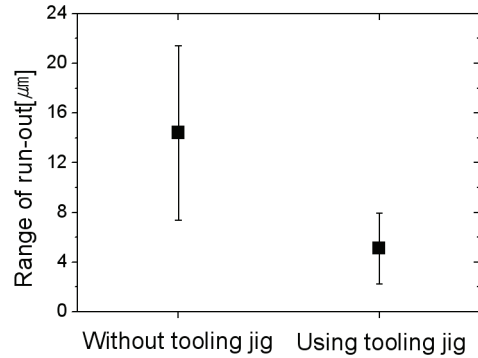


Fig. 2 Range of run-out with and without the tooling jig

3. 마이크로 슬롯 가공 특성 분석

3.1 마이크로 슬롯 가공 실험 방법

엔드밀의 가공특성 분석, 채널 형상의 마이크로 구조물 가공, 가공폭의 최소화를 위해 기초실험 방법으로 슬롯 가공법을 선택하였다. 공구 직경(d_t), 이송속도(f), 절삭깊이(a_p)를 가공조건 변수로 선정하였고 실험을 통하여 가공면의 상태 및 조도, 절삭력¹³을 분석하고자 하였다. 가공 공구는 직경 $50 \mu\text{m}$ 와 $30 \mu\text{m}$ 의 초경 엔드밀을 사용하였으며 각각의 회전속도(rpm)는 직경 차이를 고려하여 $50,000 \text{ rpm}$ 과 $60,000 \text{ rpm}$ 으로 구분하였다. 세부적인 실험방법 및 조건은 Fig. 3과 Table 1에 나타났다.

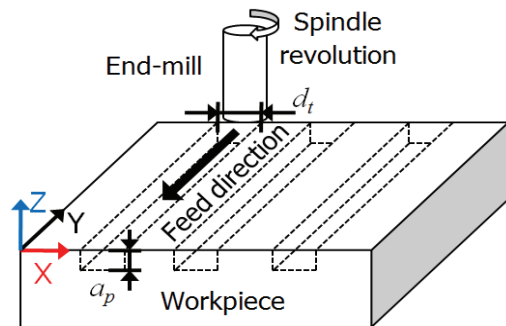


Fig. 3 Experimental method of micro slot machining experiment

Table 1 Cutting conditions

Cutting tool	WC Ø 30 and 50 µm flat end-mill
Workpiece	6:4 brass
Spindle revolution	50,000 and 60,000 rpm
Feed rate (f)	10, 20, and 50 mm/min
Cutting depth (a _p)	2, 5, and 10 µm/pass
Cutting oil	Oil mist (Kerosene)

3.2 공구 직경에 따른 채널 형성 상태 분석

전자주사현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 가공된 표면의 상태를 분석하였으며 Fig. 4 에 직경 50 µm 엔드밀을 이용한 가공 결과를, Fig. 5 에 직경 30 µm 엔드밀을 이용한 결과를 나타냈다. 동일 가공깊이와 이송속도의 조건에서 50 µm 엔드밀 가공에 비해 30 µm 의 엔드밀 가공에서 버의 발생량이 많았다. 공구 직경 변화에 따라 가장 크게 영향을 받는 요소는 절삭속도이다. 공구 직경 50 µm 에서 절삭속도는 7.85 m/min 로, 직경 30 µm 에서의 5.652 m/min 보다 빠르기 때문에 가공면의 상태도 절삭속도가 빠른 쪽에서 양호한 결과를 나타낸 것으로 보인다. 공구 이송속도에 대한 영향은 이송속도가 느릴 경우 더 양호한 결과를 보였다. 마찬가지로 절삭깊이에 대해서도 절삭깊이가 작을 때 버 발생량이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 공구 이송속도와 절삭깊이는 공구 회전에 따른 날당 절삭량에 영향을 미치는 요소이다. 절삭깊이 및 공구이송속도의 증가는 날당절삭량을 증가시키고 공구의 허용 절삭량 이상의 가공에 의해 버 발생이 증가한 것으로 보인다. 마이크로 슬롯가공

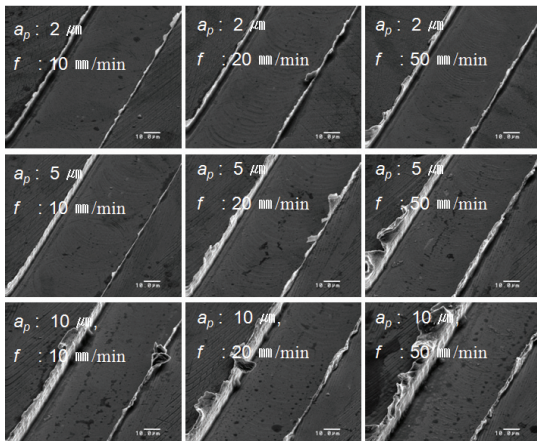


Fig. 4 The machined surface using a Ø 50 µm end-mill with various cutting conditions

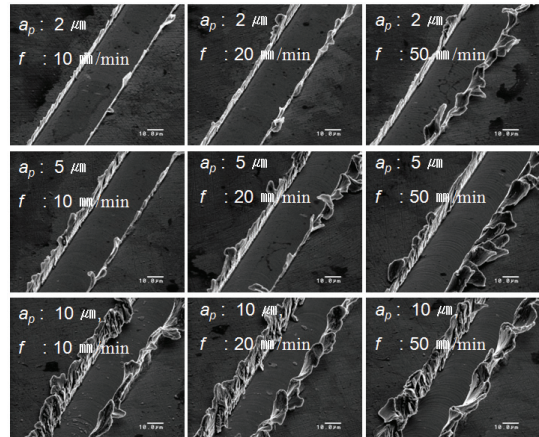


Fig. 5 The machined surface using a Ø 30 µm end-mill with various cutting conditions

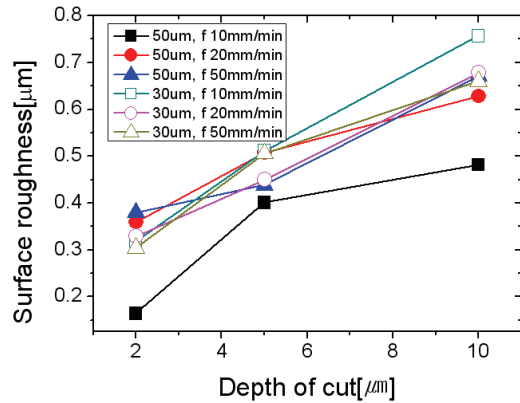


Fig. 6 Surface roughness with various diameters of end-mills and cutting conditions

에서 고품질의 미세 구조물 제작을 위해서는 일정 수준이상의 절삭속도와 그에 허용되는 절삭조건이 동반해야 함을 알 수 있다.

Fig. 6 에 공구 직경 및 가공조건에 따른 채널 바닥부의 조도(Rz)를 나타냈다. 공구 직경에 의한 영향은 50 µm 의 경우 평균적으로 0.013 µm 낮은 값으로 큰 영향을 미치지 않았다. 이송속도의 차이에서가 느릴수록 조도가 감소하는 경향을 보였으며 절삭깊이에 따른 차이가 가장 크게 발생한 것을 확인하였다.

3.3 공구 직경 변화에 따른 절삭력 분석

Fig. 7 에 공구 직경 변화 및 가공조건에 따른 절삭력 차이를 비교하였다. 그래프를 통해서 알 수

있듯이 직경 50 μm 엔드밀을 이용한 가공에서의 절삭력이 직경 30 μm 엔드밀을 이용했을 때 보다 크게 발생했다. 공구 직경 50 μm 의 공구에서는 날당절삭량이 30 μm 공구에 비해 크기 때문에 절삭력 또한 크게 발생한 것으로 간주된다. 날당절삭량이 커지는 방향인 절삭깊이의 증가와 공구 이송속도의 증가도 절삭력이 증가하는데 영향을 미쳤다. 절삭력과 채널 형성상태, 조도의 상관 관계가 동일한 경향성을 나타내고 있으므로 초소경 공구를 이용한 마이크로 구조물 가공에서 절삭력 측정을 통하여 표면상태 예측이 가능함을 알 수 있다.

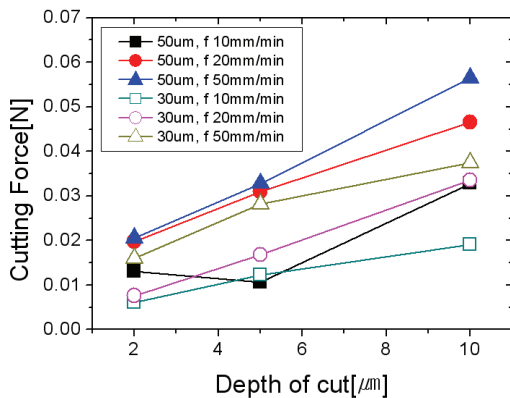


Fig. 7 Cutting force with various diameters of end-mills and cutting conditions

4. 예각형상 구조물의 가공특성

4.1 예각형상 구조물

마이크로 구조물에서는 마이크로 니들, 채널의 분기부에서와 같이 예각 구조물이 존재한다. 예각 구조물은 강성이 약해 변형이 쉽게 발생하며 협각화 될수록 큰 문제가 발생할 수 있다. 따라서 마이크로 엔드밀의 예각 구조물의 가공특성을 분석을 위한 가공실험을 수행했다. 구조물 각도, 반경방향 절삭깊이(a_e)를 가공실험의 변수로 선정하고 예각부 구조물의 변형 정도를 주사전자현미경을 통하여 분석하고자 하였다. 각도 변화는 30, 60, 90° 이며, 반경 방향 절삭깊이는 5, 10, 20 μm 로 선정하였다. 그 외의 가공조건은 WC 100 μm flat end-mill, 64brass 시편, 50,000 rpm, 축방향 절삭깊이 5 μm , 공구이송속도 10 mm/min 으로 고정하였다.

4.2 각도변화에 따른 가공결과

각각의 각도변화에 따른 분기부의 가공결과를 주사전자현미경으로 분석하여 Fig. 8 에 나타냈다. 30° 각도의 구조물에서 변형이 가장 크게 발생하였으며 각도가 커질수록 변형이 줄어들었다. 절삭깊이 변형이 각도가 협각화될수록 채널의 변형이 심하게 발생하는 것을 확인 하였다. 또한 절삭깊이가 작을수록 변형 발생 정도가 감소하는 것을 확인하였다. 60° 의 예각 구조물은 가공조건 수정을 통하여 구조물 변형을 감소시킬 수 있으나 30° 이하의 예각 구조물 가공에서는 가공조건 이외에 공정의 변화가 필요함을 알 수 있다.

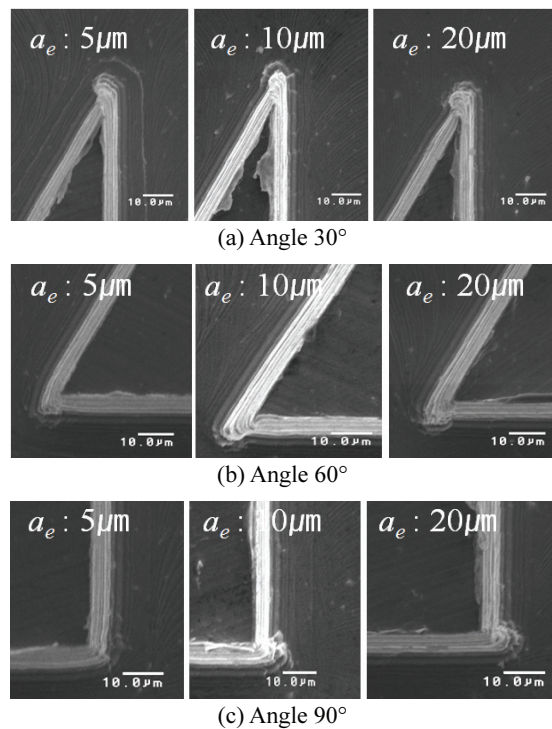


Fig. 8 The machined narrow angle structures with various angles

5. 마이크로 엔드밀링 응용가공 기술

5.1 유체분석기용 미세 채널 부품 가공

엔드밀을 이용하여 가공된 마이크로 채널 구조물을 바이오칩 및 마이크로 유체분석기(μ -Total Analysis System, μ -TAS)에 응용하기 위해서는 초소경 엔드밀의 슬롯가공기술 및 예각 가공기술을 필요로 한다. 앞서 이루어진 슬롯가공실험 및 예각 가공

기술을 바탕으로 마이크로 유체 채널가공에 응용하였다. Fig. 9(a)는 50, 30 μm 엔드밀을 이용하여 양각형상으로 가공된 마이크로 채널이며 Fig. 9(b)는 100 μm 엔드밀, 공구이송 20 mm/min, a_p 5 $\mu\text{m}/\text{pass}$ 의 가공조건을 통해서 음각형상으로 가공된 마이크로 채널을 나타낸 것이다. 가공결과는 채널 부의 버 및 변형이 거의 없는 상태로 유체 채널로 사용하기 가능한 수준으로 판단된다.

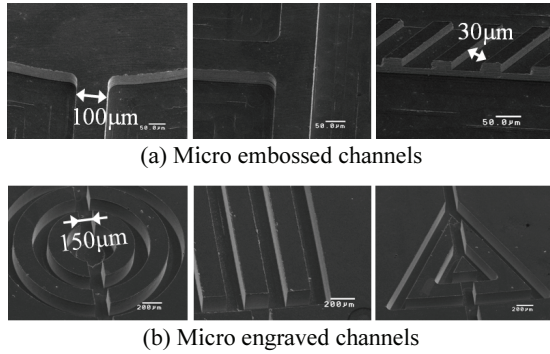


Fig. 9 The machined micro fluidics channels for mixer and μ -TAS

5.2 공기베어링용 미세 스파이럴 패턴 가공

마이크로 스파이럴 패턴 구조물은 하드디스크의 부상에 사용되는 공기 베어링 부품의 핵심 구조물의 하나이다. 마이크로 엔드밀을 이용한 스파이럴 구조물의 가공을 위해서는 슬롯가공기술 및 예각부 가공기술을 필요로 한다. 기초 실험을 통한 마이크로 엔드밀링 기술을 응용하여 6 mm 크기의 원형 마이크로 스파이럴 패턴 구조물에 적용했다. 직경 100 μm 엔드밀, skd 11 시편, 50,000 rpm, 공구 이송 10 mm/min, 절입 2 $\mu\text{m}/\text{pass} \times 5$ pass의 가공조건을 이용하여 가공된 스파이럴 패턴을 Fig. 10에 나타냈다. SKD 11 소재는 황동에 비해 고경도 소재이기 때문에 엔드밀의 마모에 의해 버 발생이 더 크게 나타났다. 고경도소재의 마이크로 가공에서는 가공조건 및 공정에 변화가 필요하였다.

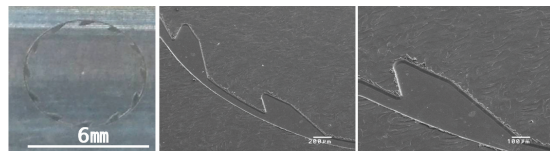


Fig. 10 The machined surface of micro spiral structures

6. 결론

본 연구에서는 마이크로 형상 부품 및 구조물 제작을 위한 초소경 마이크로 엔드밀 가공 기술에 대한 기본적인 특성 평가 및 응용 가공을 수행하였다. 마이크로 엔드밀 공구 세팅과정에서 발생하는 회전오차 감소를 위해 정밀 공구 세팅장치를 제작하였으며 회전 오차량을 기존대비 9.3 μm 감소시킬 수 있었다. 또한 직경 30 μm 공구를 안정적으로 사용할 수 있는 공구 세팅 기술을 확보하고, 이를 기반으로 슬롯가공 실험을 통해 가공면과 조도, 절삭력 분석을 수행하여 가공특성을 평가하였고 30° 예각 구조물 가공실험을 통하여 협각 가공특성을 분석하였다. 기초 실험을 바탕으로 채널 형상과 협각 구조를 포함한 마이크로 유체 채널, 공기 베어링용 스파이럴 패턴 구조물 가공에 응용하였다.

후 기

본 연구는 지식 경제부의 전략기술개발사업 생기반 연구 과제 및 국가연구개발 사업 고종형비형상 공정 기반 구축 사업결과임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Han, M., Lee, W., Lee, S. K., and Lee, S. S., "3D microfabrication with inclined/rotated UV lithography," Sensors and Actuator A: Physical, Vol. 111, No. 1, pp. 14-20, 2004.
2. Hartl, I., Li, X. D., Chudoba, C., Ghanta, R. K., Ko, T. H., Fujimoto, J. G., Ranka, J. K., and Windeler, R. S., "Ultra-high-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber," Optics Letters, Vol. 26, No. 9, pp. 608-610, 2001.
3. Loh, B. K., Kim, W., and Shim, K. B., "Fabrication of Micro-channels for Wave-Micropump Using Stereolithography and UV Photolithography," J. of the KSPE, Vol. 24, No. 12, pp. 128-135, 2007.
4. Noh, Y. J., Arai, Y., Tano, M., and Gao, W., "Fabrication of large-area micro-lens arrays with fast tool control," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 9, No. 4, pp. 32-38, 2008.

5. Kang, I. S., Jeong, Y. S., Kwon, D. H., Kim, J. H., Kim, J. S., and Ahn, J. H., "Tool Condition Monitoring using AE Signal in Micro Endmilling," *J. of the KSPE*, Vol. 23, No. 1, pp. 64-71, 2006.
6. Kim, S. J., Kim, K. S., Cho, B. M., Kim, H. C., and Lee, D. J., "Characteristics of slot machining by using micro endmill," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 245-246, 2007.
7. Je, T. J., Choi, D. S., Lee, E. S., Hong, S. M., Lee, J. C., and Choi, H., "Micro end-milling technology for micro pole structures," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 4, No. 4, pp. 7-13, 2005.
8. Jeon, D. S., Seo, T. I., and Yoon, G. S., "A study of machining error compensation for tool deflection in side-cutting processes using micro end-mill," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 128-134, 2008.
9. Hsieh, H. and Chu, C., "Optimization of tool path planning in 5-axis flank milling of ruled surfaces with improved PSO," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 1, pp. 77-84, 2012.
10. Kim, G. H., Yoon, G. S., Son, J. I., and Cho, M. W., "Investigation on the effect of low temperature micro cutting process for mold core material," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 5, pp. 783-788, 2012.
11. Je, T. J., Jeon, E. C., Jang, S. H., Choi, D. S., Choi, H. J., and Park, E. S., "Machining technology of micro shape parts using micro end-mill," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 203-204, 2012.
12. Lee, K. Y., Lee, D. K., Lee, K. W., Park, J. H., and Kim, J. S., "Runout modeling and measurement method in 4-flutes end milling," *J. of the KSPE*, Vol. 21, No. 3, pp. 22-29, 2004.
13. Hong, Y. C., Ha, S. J., and Cho, M. W., "Predicting of cutting forces in a micromilling process based on frequency analysis of sensor signals and modified polynomial neural network algorithm," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 1, pp. 17-23, 2012.