

◆ 특집 ◆ 최신 정밀 설계재료 기술 I

초정밀 진동 보조 가공 연구 동향

Current Trends of Vibration-Assisted Machining in Micro/Nano Scales

이문구¹, 전용호^{1,✉}
Moon Gu Lee¹ and Yongho Jeon^{1,✉}

¹ 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou Univ.)
✉ Corresponding author: princaps@ajou.ac.kr, Tel: 031-219-3652

Manuscript received: 2012.5.24 / Accepted: 2012.6.5

Recently, mechanical components with miniaturized size, complex shape and fine surface are on demand from industries such as mobile electronics, medical devices and defense. The size of them is smaller than several millimeters, the shape has micro-holes, curve, or multi-step and the surface is mirror-like. This features are not able to be machined with the conventional machining, therefore electro-discharge machining (EDM), cutting, and laser machining have been applied. If the technologies are assisted by vibration, high aspect ratio and good surface are to be achieved. In this paper, prior and current researches of vibration-assisted machining are reviewed. Machining mechanisms with vibration-assisting are explained, their effects are shown, and vibrating apparatuses are discussed. Especially, comparison between with and without vibration assisting is presented. This review shows the vibration-assisted machining is effectively fabricate the components with small and complicated shape and fine surface finish.

Key Words: Vibration (진동), Machining (가공), Vibration-Assisted Machining (진동보조가공), Aspect Ratio (종횡비), Surface Finish (면품질), MRR (가공율)

1. 서론

재료 개발 기술의 발달과 그 재료를 활용한 각종 정밀 부품의 설계가 산업체 전반에서 다양하게 요구되고 있다. 특히 Fig. 1 과 같이 휴대폰의 전자 기기와 인체의 장기를 진단하기 위한 내시경 부품과 장치들은 수 mm 크기 내에 복잡한 시스템이 복합적으로 조립되며 그를 위한 복합 공정의 중요성이 더욱 높아지고 있는 추세이다. 이를 위한 가공 및 조립 기술은 지속적인 연구 및 개발이 이루어지고 있으며, 공작물의 정밀도 향상을 위해 재료를 옮기지 않고 모든 공정을 한번에 진행할 수 있는 복합 가공기에 대한 연구도 활발히 이루어

지고 있다. 그 예로 일반적인 절삭 가공이 아닌, 레이저, 방전, 그리고 연삭 공정과 융합하는 많은 연구들이 이루어지고 있지만 가공에 많은 시간이 소요되거나, 재료의 특별한 성질로 인한 가공성

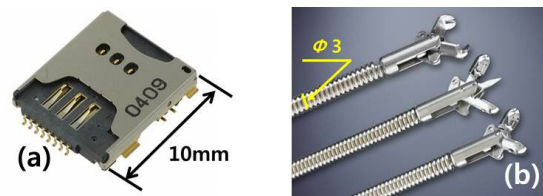


Fig. 1 Examples of precision components: (a) SD card connector,¹ (b) Endoscopic devices²

저하로 상용화에 어려움을 겪고 있다.

진동 보조 가공 (Vibration-Assisted Machining)이 소개되어 현재까지 그 적용 분야를 확대하며 활발한 연구가 진행되고 있다. 진동 보조 가공법은 공구에 수십 kHz 수준의 주파수와, 수 마이크로 미터의 진폭을 부가하여 가공을 하는 방법으로 다양한 공법의 연성 및 취성 재료, 복합소재 및 세라믹 재료 가공에 적용되고 있다.

본 논문에서는 진동 보조 가공이 정밀한 가공과 높은 면 품질을 가질 수 있게 하는 가공 메커니즘에 대해 간단히 언급하고, 절삭 및 방진 가공에 있어서의 진동 보조 가공 적용 사례와 그 효과를 분석하며, 진동을 일으키는 장치에 대해 설명하고자 한다.

2. 절삭 가공

Micro 단위의 가공은 정밀한 부품을 보다 빠르고 쉽게 만들 수 있는 장점이 있으나 공구의 크기 대비 높은 절삭력의 작용으로 인한 공구 파손이라는 단점을 극복하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 지금까지 주로 선반과 드릴 공정에 기반을 둔 연구들이 진행되어 왔으나, 최근 Lee 와 Li³ 가 밀링 공정에 기반을 둔 연구를 시작하였다.

2.1 가공 메커니즘

Brehl 과 Dow⁴ 는 진동보조 절삭가공의 종류를 1 차원과 2 차원 가공으로 분류하고, 진동을 일으키는 기구에 대해서 간단히 조사하였으며, 진동보조가공의 메커니즘에 대한 분석과, 최근의 동향을 소개하였다.

이들은 가공물과 공구 사이에 일어나는 상대적인 진동운동이 Fig. 2 와 같은 불연속적인 접촉과 접촉 시간의 감소를 일으켜서 절삭력이 상대적으로 감소하고, 절삭 칩이 얇아지며, 진동 반복 시 공구와 가공물 사이에 절삭유가 순간 유입되어 열문제를 해결해 주는 것으로 원리를 설명하였다. 이에 따라 금속가공에 있어서 공구의 마모가 줄어들고, 면 품질이 좋아지며, 버(burr)가 적게 생기는 것으로 설명했다.

2.2 적용 사례

2.2.1 Cutting

Jin 과 Murakawa⁵ 는 S45C 와 같은 금형강에 21 kHz 의 진동을 부가하여 가공함으로써 가공성이

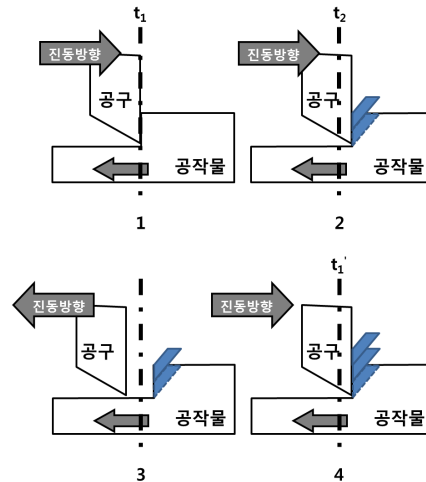


Fig. 2 Intermittent loss of contact in 1D vibration assisted machining⁴

항상되었고, 표면 거칠기는 약 10 배 향상이 되었으며, 공구의 마모 감소를 통해 수명이 증가함을 확인하였다. Xiao et al.⁶ 은 가공에 진동을 더함으로써 오히려 Chatter 를 효과적으로 없앨 수 있음을 확인하였고 인코넬 1600 재질을 활용하여 우수한 정밀도와 표면 거칠기를 확보 하였다. Ma et al.⁷ 은 Ultrasonic elliptical vibration 시스템을 개발하였고 실험을 통해 기존의 초음파를 활용한 가공 결과 대비 절삭력 감소와 개선된 표면 거칠기를 확인하였다. Liu et al.⁸ 은 초음파 진동을 추가하여 초경을 가공할 경우 가공 깊이에 따라 ductile mode 에서 brittle mode 로 변하고 진동을 추가할 경우 ductile mode 의 가공이 더욱 오래 지속됨을 확인하였다. Zhong et al.⁹ 은 알루미늄 Metal Matrix 복합재의 가공을 통해 더 나은 표면 거칠기를 확인 하였고, Nath et al.¹⁰ 은 인코넬 718 의 가공을 통해 초음파 진동을 추가하여 표면 거칠기, 절삭력, 그리고 공구 수명이 개선됨을 확인 하였다.

2.2.2 Mechanical Drilling

Zhange et al.¹¹ 은 16 kHz 의 초음파 진동을 통해 진동이 초기 미끄러짐을 방지하고, 가공 정밀도와 공구 수명이 향상 됨을 실험적으로 증명하였다. Chang 과 Bone¹² 은 초음파를 이용하여 공작물을 진동 시켜 드릴 시험을 진행하였고 진동이 모든 경우에서 우수한 결과를 보이는 것은 아니며, 버 (burr)의 높이와 길이를 줄이기 위해서는 가공 조건에 부합하는 적절한 진동 조건을 확보하여야 함

을 확인 하였다. Liu et al.¹³는 초음파 진동을 통해 Al matrix 복합재의 가공 실험 결과, 드릴 날에 발생하는 adhesion 이 감소함을 확인하였다.

2.2.3 Laser Drilling

레이저를 활용한 drilling 기술은 레이저 가공 기술 중 가장 오래된 기술 중의 하나로 난삭재를 높은 중횡비로 가공하는데 적용이 되어 왔다. 그러나 매우 정밀한 가공에도 불구하고 여전히 홀의 가공면과 열영향부, 그리고 스파터의 문제는 완벽하게 해결되지 못하였다. 이를 위해 초음파를 이용한 진동 기술을 적용하여 가공면의 품질 개선을 위한 연구가 진행되고 있다. Kang et al.¹⁴은 공작물을 초음파로 진동 시키기 위한 시스템을 개발하고, 나노초 펄스 레이저를 활용하여 pulse energy, repetition rate, 그리고 scan rate 가 증가 할수록 개선된 표면을 확인하였고, Kim et al.¹⁵은 레이저 초점 렌즈를 초음파로 진동하는 시스템을 개발하고, 나노초 펄스 레이저를 활용한 실험을 한 결과 버(Burr)의 길이 및 스파터 영향 부위가 감소함을 확인하였다.

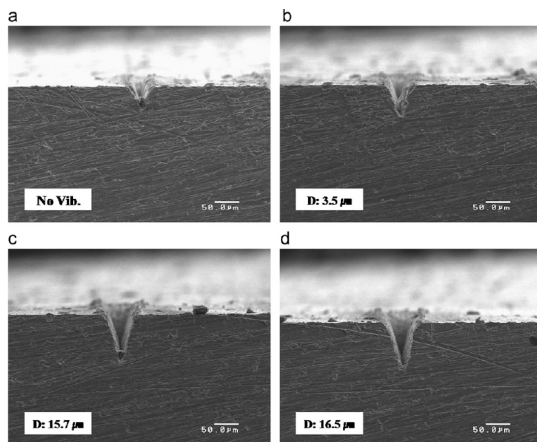


Fig. 3 Cross-sectional SEM images of machined micro-holes on copper substrate: (a) is with no vibration, (b) ~ (d) are with various vibrating amplitude, D & frequency, 500 Hz¹⁶

최근 열영향부가 없고 버(Burr)등의 가공 부산물이 발생하지 않는 장점을 가진 펄스 레이저를 활용한 드릴링 기술이 여러 분야로의 적용을 위해 활발히 개발 중이며, Park et al.¹⁶은 가공면의 표면을 개선하기 위한 연구로 초음파 진동 부가한 시

스템을 개발하고, 기존 펄스 레이저 가공 공정 대비 가공성의 향상은 물론, 버(Burr) 높이, 가공면의 표면 거칠기를 제어 할 수 있음을 제안하였다. Fig. 3 은 이러한 기법을 통하여 중횡비와 가공면을 크게 개선할 수 있음을 보여준다.

3. 방전 가공

방전가공 (EDM)은 가공이 어려운 재료의 가공을 위해 가장 많이 사용되고 있는 공법 중의 하나로 다양한 세라믹 계열의 재료는 물론 금속 재료의 가공을 위해 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히 micro 단위의 가공에서 다른 공법에 비해 난삭재를 가공하기 쉬운 장점을 가지고 있어서 많은 연구가 진행되고 있다.

3.1 가공 메커니즘

Endo et al.¹⁷은 금속 가공물에 대해 진동 보조를 통한 방전 가공의 가공시간 감소와 가공 안정성 증가에 대한 연구를 보고하였다. 간단한 진동기구에 대해서도 설명하였다. 추가로 복잡한 형상을 가공하는데 있어서 진동보조 방전가공을 이용하면 더 좋은 치수 정밀도와 면 품질을 얻을 수 있다는 예를 보여주었다.

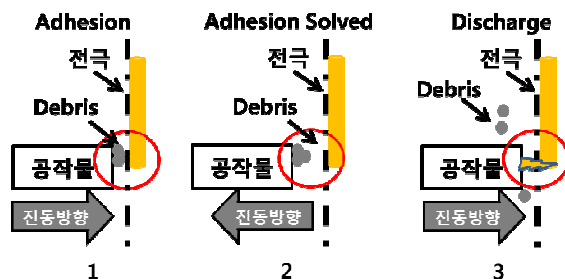


Fig. 4 Effect of adhesion on EDM stability¹⁷

이들은 방전가공 중에 생기는 부스러기(debris)가 공구와 가공물 사이의 진동에 의해서 더 잘 씻겨 나간다고 보았다. 이에 따라 Fig. 4 와 같이 이 부스러기가 둘 사이에 끼어서 방전가공이 일시적으로 중단되는 일이 적게 생겨서 연속적이고 안정성 높은 가공이 가능하다고 언급하였다.

3.2 적용 사례

Masuzawa 와 Heuvelman¹⁸은 전극을 사인파 형

태로 움직여 줌으로써 chip 과 debris 의 배출을 향상시켜 높은 중형비의 홀을 가공하였다. 이후 Kremer et al.^{19,20} 은 공구에 20 kHz 초음파 진동을 가하는 연구를 진행하였다. 이를 통해 전극의 펄핑 효과로 인한 slurry 의 배출이 용이해져 보다 안정적인 공정을 유지할 수 있었으며 진동에 의한 간극 사이의 압력 변화로 금속의 재 결정화를 막아 가공율이 향상 됨을 확인하였다. Ghoreishi 와 Atkinson²¹ 은 Die-sinking EDM 전극의 축방향, 회전 방향, 그리고 그 복합 방향과 진동수의 고/저에 대한 효과를 재료의 가공률, 공구 마모율, 그리고 표면 거칠기를 통해 분석하였다. 그 결과 높은 주파수를 활용한 전극의 복합 방향 진동이 pure EDM, rotary EDM, 그리고 vibratory EDM 공정 대비 보다 효율적인 공정임을 확인하였다. 특히 Gao 와 Liu²² 는 공구의 진동이 아닌 공작물에 진동을 가한 실험을 진행하였고, 진동이 부여된 Micro-EDM 공정은 진동이 부여되지 않은 공정 대비 8 배 이상의 효율을 가짐을 확인하였다. Chern 과 Chuang²³ 은 non-circular micro-electrodes 와 micro-die openings 을 제작하기 위한 진동 테이블을 개발하였고 진동을 부가한 가공은 Micro-EDM 공정 효율을 향상시킴을 증명하였다. Endo et al.¹⁷ 은 진동에 의한 가공 안정성에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 방전 펄스의 주파수와 가공 테이블의 feeding-back action 을 측정 한 실험을 진행한 결과 방전 펄스의 주파수가 높을 수록 더욱 안정적인 가공을 할 수 있음을 확인하였다. 반면 Lee 와 Li²⁴ 는 진동의 최대 전류와 펄스 폭이 가공 재료의 손상 깊이를 증가시키며, 미세 크랙의 평균 길이, 폭, 그리고 개수를 증가 시킴을 확인하였고 특히 최대 전류의 영향도가 높음을 증명하였다. 또한 이러한 손상부와 미세 크랙은 최대 전류와 펄스 폭을 작게 할 경우 제거 할 수 있었다. Abdullah et al.²⁵ 는 공구의 진동을 마무리 공정에 추가 할 경우 열영향부, recast 층, 그리고 표면에 발생하는 크랙을 줄일 수 있음을 확인하였다.

4. 진동기구

진동보조가공의 진동기구는 해당 진동을 가공물에 주는 방식과 공구에 주는 방식으로 분류할 수 있다. 또한, 공진을 이용한 방식과 이용하지 않은 방식으로 나눌 수 있다.

4.1 가공물 진동 방식

Kang et al.,¹⁴ Zheng 과 Huang²⁶ 은 가공물을 진동시키는 방식을 레이저 가공에 적용하였다. 이 방법은 주로 자왜구동기 (Magnetostrictive actuator)나 압전소자 (Piezoelectric Transducer, PZT)를 사용하여 가공물을 진동시킨다. 일반적으로 가공물이 공구에 비해서 크거나 무거운 경우가 많으므로 전자의 경우는 큰 전류가 필요하고, 후자의 경우는 고전압이 필요하다.

Kang et al.¹⁴ 의 장치는 임의의 주파수와 진폭으로 제어할 수 있게 설계되었다. 진동 장치가 공진 주파수가 아닌 주파수를 가지면 주파수와 진폭에 대해서 효과적인 가공 조건을 찾기에 좋다. 그러나, 공진에서 진동이 일어나면 고출력의 전류나 전압이 없이도 큰 진동을 일으킬 수 있는 장점이 있는 대신 진동을 임의로 제어할 수 없다.

4.2 공구 진동 방식

Kim et al.,¹⁵ Park et al.,¹⁶ Endo et al.¹⁷ 은 공구를 진동시키는 방법을 선택하였다. 첫 번째 연구는 공진주파수에서 진동하는 기구를 레이저 가공에서 선택하였고, 나머지 두 연구는 임의로 진폭과 주파수를 제어하는 방식을 방진가공에 적용하였다. 이 방법은 공구가 가벼우면 적은 출력으로 공구와 가공물 사이의 진동을 일으킬 수 있다.

Kim et al.¹⁵ 의 장치를 Fig. 5 에 나타내었다.

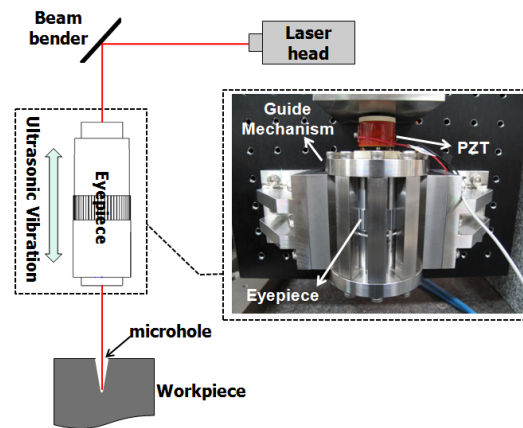


Fig. 5 Laser machining with vibrating tool (laser)¹⁵

이는 진동보조 레이저 가공을 위하여 공진주파수에서 레이저의 조사방향에 대해서 수직으로 레이저 빔을 진동시키는 기구이다. 레이저 빔을 진

동시키기 위하여 대물렌즈에 해당하는 Eyepiece 를 진동시키고 있다. 여기에는 구동기로써 압전소자가 채택되었고 압전소자의 공진은 Eyepiece 가 장착된 기구를 통하여 Eyepiece 에 전달된다. 고주파 진동을 위해서는 구동기와 기구가 고강성을 갖도록 설계되어야 한다. 이 경우의 공진주파수는 23.6 kHz, 진폭은 3 μ m 이다.

5. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 진동을 활용한 가공은 다양한 공법에서 재료의 가공성 향상은 물론 표면 거칠기의 개선과 가공 정밀도 향상에 기여함을 확인하였다. 특히 연성 및 취성 재료 그리고 복합 재료에 상관없이 진동을 적용한 가공으로 수십 나노급의 정밀도를 가지는 표면을 확보 할 수 있음은 물론 기존 공법 대비 가공 결과물의 중형비도 확연히 증가 함을 확인 할 수 있었다.

진동을 임의로 제어하여 최적의 가공조건을 찾으려면, 진동수와 진폭을 갖도록 구동기와 제어시스템이 적용된 것을 활용해야 한다. 진동을 위한 출력을 효율적으로 활용하고 큰 진폭을 얻으려면 공진을 활용하는 것이 유리하다.

이와 더불어, 정밀 부품 및 형상 그리고 다양한 재료의 가공을 위해 복합 공정을 하나의 시스템 내에서 통합하는 연구도 함께 진행되어야 하며 이러한 연구가 정부 주도로 진행되고 있다. 또한 진동 보조 가공 공정의 최적화, 추가 공정의 통합 등을 통한 종합적인 가공 기술들의 개발 및 연구가 지속적으로 진행 되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2011 학년도 아주대학교 정착연구비 지원과 2011 학년도 아주대학교 일반연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Digi-Key Co., <http://parts.digikey.com/1/parts-kws/67539-card-connector-microsd.html>, (Accessed 23 May 2012).
2. Cook Group Medical Manufacturing Co., <http://www.cookmedical.com/esc/dataSheet.do?id=5292>, (Accessed 23 May 2012).

3. Lee, S. H. and Li, X., "Study of the Surface Integrity of the Machined Workpiece in the EDM of Tungsten Carbide," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, No. 1-3, pp. 315-321, 2003.
4. Brehl, D. E. and Dow, T. A., "Review of vibration-assisted machining," *Precision Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 153-172, 2008.
5. Jin, M. and Murakawa, M., "Development of a Practical Ultrasonic Vibration Cutting Tool System," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1-3, pp. 342-347, 2001.
6. Xiao, M., Sato, K., Karube, S., and Soutome, T., "The Effect of Tool Nose Radius in Ultrasonic Vibration Cutting of Hard Metal," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 13, pp. 1375-1382, 2003.
7. Ma, C. X., Shamoto, E., Moriwaki, T., and Wang, L. J., "Study of Machining Accuracy in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1305-1310, 2004.
8. Liu, K., Li, X. P., Rahman, M., and Liu, X. D., "Study of Ductile Mode Cutting in Grooving of Tungsten Carbide with and without Ultrasonic Vibration Assistance," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 5-6, pp. 389-394, 2004.
9. Zhong, Z. W. and Lin, G., "Ultrasonic Assisted Turning of an Aluminium-based Metal Matrix Composite Reinforced with SiC Particles," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1077-1081, 2006.
10. Nath, C. and Rahman, M., "Effect of Machining Parameters in Ultrasonic Vibration Cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 9, pp. 965-974, 2008.
11. Zhang, D. Y., Feng, X. J., Wang, L. J., and Chen, D. C., "Study on the Drill Skidding Motion in Ultrasonic Vibration Microdrilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 6, pp. 847-857, 1994.
12. Chang, S. S. F. and Bone, G. M., "Burr Size Reduction in Drilling by Ultrasonic Assistance," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 4-5, pp. 442-450, 2005.

13. Liu, C. S., Zhao, B., Gao, G. F., and Zhang, X. H., "Study on Ultrasonic Vibration Drilling of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Key Engineering Materials*, Vol. 291-292, pp. 447-452, 2005.
14. Kang, B., Kim, G., Cho, S., Park, J., and Yang, M., "The Effects of Ultrasonic Vibration on Surface Finish in Nano-second Laser Machining," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 402-406, 2010.
15. Kim, W., Jeon, Y., and Cho, S.-H., "Analysis and Experiment of Ultrasonic Vibration Mechanism using PZT Actuator for Precision Laser Machining," *Journal of the KSPE*, Vol. 28, No. 12, pp. 1347-1352, 2011.
16. Park, J., Yoon, J., and Cho, S.-H., "Vibration Assisted Femto Second Laser Machining on Metal," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No. 6, pp. 833-837, 2012.
17. Endo, T., Tsujimoto, T., and Mitsui, K., "Study of Vibration-assisted Micro-EDM - The Effect of Vibration on Machining Time and Stability of Discharge," *Precision Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 269-277, 2008.
18. Masuzawa, T. and Heuvelman, C. J., "Self Flushing Method with Spark- Erosion Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 1, pp. 109-111, 1983.
19. Kremer, D., Lebrun, J. L., Hosari, B., and Moisan, A., "Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 199-202, 1989.
20. Kremer, D., Lhiaubet, C., and Moisan, A., "Study of the Effect of Synchronizing Ultrasonic Vibrations With Pulses in EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 211-214, 1991.
21. Ghoreishi, M. and Atkinson, J., "A Comparative Experimental Study of Machining Characteristics in Vibratory, Rotary and Vibro-rotary Electro-discharge Machining," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, No. 1-3, pp. 374-384, 2002.
22. Gao, C. and Liu, Z., "A Study of Ultrasonically Aided Micro-electrical-discharge Machining by the Application of Work Piece Vibration," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 139, No. 1-3, pp. 226-228, 2003.
23. Chern, G. L. and Chuang, Y., "Study on Vibration-EDM and Mass Punching of Micro-holes," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 180, No. 1-3, pp. 151-160, 2006.
24. Lee, S. H. and Li, X., "Study of the Surface Integrity of the Machined Workpiece in the EDM of Tungsten Carbide," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, No. 1, pp. 315-321, 2003.
25. Abdullah, A., Shabgard, M. R., Ivanov, A., and Shervanyi-Tabar, M., "Effect of Ultrasonic Assisted EDM on the Surface Integrity of Cemented Tungsten Carbide (WC-Co)," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 3-4, pp. 268-280, 2009.
26. Zheng, H. Y. and Huang, H., "Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes," *J. Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 8, pp. N58-N61, 2007.