한국정밀공학회지 제 25 권 제 9 호 (2008 년 9 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 9, September 2008

◆특집◆ 하이브리드 제조기술

하이브리드 공작기계

박정우*, 이득우**

Hybrid Machine Tools

Jeong Woo Park* and Deug Woo Lee**

Key Words : Hybrid machine tool (하이브리드 공작기계), Hybrid Machining (하이브리드 가공), Hybrid Manufacturing System (하이브리드 생산시스템), Meso/Micro/Nano machining (메조/마이크로/나노 가공)

1. 서론

글로벌화에 의한 세계시장에서의 공격적인 경쟁체제와 빠른 제조산업의 발전은, 각종 가공기술과 생산시스템의 개발에 있어서 기술적 정체를 허용하지 않고 있다. 가공기술에 있어서는 전통적 기계가공과 특수가공의 결합에 의하여 생산성 향상 또는 한계기술을 극복하고자 하는 여러 연구가 진행되고 있으며, 이를 위한 생산시스템에 있어서는 하드웨어 및 소프트웨어적 가변구조도입 [1] 또는 각종 부가장치와의 결합을 통한 복합화에 중점을 두고 있다.[2]

이러한 복합적 가공기술 및 생산시스템의 복합화를 "하이브리드 기술"이라 하는데, 최근 고유가 상황에 따라 전기모터가 부가된 하이브리드 자동차에 대한 관심이 고조되면서 하이브리드란 단어는 더 이상 생소하지 않게 되었다.

공작기계 또는 생산시스템의 관점에서 하이브리드화는 하나의 시스템에서 두가지 이상의 상이한 기계가공기술을 동시 또는 일련의 작업으로 수행 할 수 있는 방법으로서, 다양한 장점을 가지고 있다. 실수요자의 입장에서는, 각 가공방식에 특화된 제어부, 공구부, 시스템부로 구성된 공작기계를 여러 대 구매하는 것 보다는 하나의 시스템에서 이종의 가공방식을 구현할 수 있는 하이브리드 공작기계의 구입이 경제적이다. 이러한 하이브리드 생산 시스템은 각 가공공정을 수행하기 위해 공작물을 다른 공작기계로 이동시키는 시간과 가공을 수행하기 위한 준비작업뿐 만 아니라 검사시간 또한 단축시킬 수 있다. 한편, 공작기계 생산자의 입장에서는, 이종의 가공공정을 위한 공작기계의 설계 및 제작과정을 거치지 않고, 하나의 일반적인 생산시스템을 통하여 두가지 이상의 가공공정을 가능하게 한다는 장점이 있다.

최근에는 하이브리드 생산시스템이 이종이상의 복합가공을 실현하는 장치의 의미일 뿐 만 아니라 공작기계 자체의 재구성 또는 재조합에 의한 생산공장의 개념으로도 거론되고 있다.[3-5] 본 논문에서는 생산성향상, 비용절감, 가공품위개선 등의 여러 장점을 목적으로 한 하이브리드 가공기술을 뒷받침할 수 있는 하이브리드 생산시스템의 현황에 대하여 분석해 보고자 한다.

2. 하이브리드 가공 및 생산시스템

하이브리드 생산시스템은 현재까지 연구개발이

* 부산대학교 IIIC
** 부산대학교 나노시스템공정공학과
Tel. 055-350-5281, Fax. 055-351-2982
Email: dwoolee@pusan.ac.kr
생산 시스템 특히, 가공시스템의 복합화, 초정밀화, 초소형화 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

진행되고 있는 하이브리드 가공기술을 실현시키기 위한 변형된 기계장치를 지칭하는 것으로, 대부분 실험실 수준에서 기존의 공작기계에 부가장치를 부착하는 복합가공기 방식으로 진행되고 있다. 이러한 가공기는 가공 대상물에 적합한 두가지 이상의 가공공정을 동일한 시스템상에서 구현할 수 있다. 단순한 조합의 의미보다는, 공정분할에 따른 제품의 정밀도 문제를 해소할 수 있으며, 가공효율을 향상시킬 수 있다는 이점을 가지고 있다.

초기에는 터닝머신과 밀링머신을 동시에 수행하는 정도의 개량된 시스템이 소개되었으며, 이후 PCD (Polycrystalline diamond) 공구의 개발을 위하여 연삭 및 방전가공 (EDM) 을 가능하게 하는 가공기가 1990 년대 초반에 소개되었다.[6]

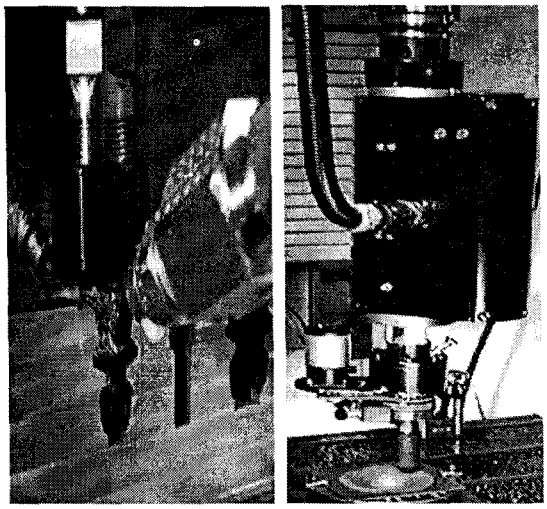

Fig. 1 Retrofit hybrid HSM system: Grinding/HSM (left) and EDM/HSM (right)

일례로, Aspinwall[2] 등은 Fig. 1 과 같이 고속가공 (HSM) 시스템에서 연삭 또는 방전가공을 동시에 수행할 수 있는 하이브리드 시스템을 소개하였다. 연삭은 포인트 연삭 (point grinding) 방식을 채택하였는데, 휠의 직경을 고려한 고속스핀들의 개발이 선행되어야 한다는 점을 명시하고 있다. 예를 들어, 직경 10 mm 의 포인트 연삭 CBN 휠을 적용할 경우, 60,000 rpm 급 이상의 고속스핀들이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 공기복합윤활을 적용한 세라믹 볼 베어링을 사용하여 적절한 사양의 스핀들을 장착하였다. 그러나 고속 스핀들 부가에 따른 z 축의 이송거리가 변화된다는 것에 유의하여 부가장치를 설계해야 한다. EDM / HSM 하이브리드 시스템은 표면의 미소형상 가공을 목적으로 하기 때문에, 볼스크류와 DC 서보모터가 탑재된 EDM 헤드를 장착하여 공작기계의 z 축 간섭을 보완하였으며, 수계 방전액의 사용을 권장하였다. 상기의 하이브리드화는 각 가공공정이 동시에 이루어지기 보다는 부가장치의 도입에 따른 일련의 순차적 공정에 기반을 두고 있다. 유사한 방식으로, creep feed 연삭과 HSM 의 복합화,[7] 밀링공정의 황삭가공에 이은 laser 응용 정삭가공 복합화 등의 하이브리드 시스템도 소개되었다.

상기의 하이브리드 시스템과는 달리, 각 가공방식이 동시에 수행되는 형태의 연구도 다수 진행되었다. 이들은 다시 두 가지의 패턴으로 분류가 되는데, 각 공정이 가공에 직접 참여하는 방식과 가공에 직접 참여하지는 않지만 상대 공정을 도와주는 방식으로 분류된다. 가공에 직접 참여하는 방식으로는 재료표면의 전기/화학적 반응을 유도하여 가공정도 및 효율성을 높이는 전기화학가공 (ECM), 방전가공과 연삭을 각각 복합한 EDG[8] / ECG,[9] 그리고 Laser 가공을 전기화학가공과 복합화한 LAJECM[10] (Fig. 2) 등이 소개되고 있다.

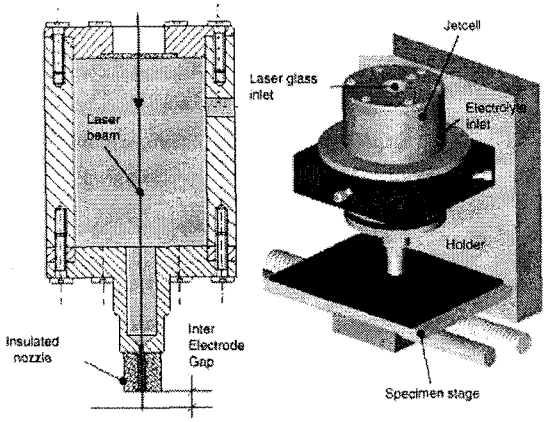

Fig. 2 LAJECM apparatus systems: Jetcell cross-section (left), Machining chamber with specimen stage (right)

가공에 직접 참여하지 않지만 상대 공정을 뒷받침해주는 방식으로는, 대표적으로 연삭에서 전기화학적인 드레싱을 적용한 ELID[11] 연삭 시스템

이 1990 년대에 소개되었다. 이후, 이와 유사하게 ECDM (Electrochemical Discharge Machining) 방법을 적용하여 연삭공정에서의 드레싱/트루잉을 구현하기도 하였다.[12] ECDM 은 EDM 가공부위의 표면처리를 ECM 방식으로 마무리하는 방식의 순차적 가공방식으로서 1980 년대에 처음 소개되었다.[13,14] 최근에는 Plasma 열원을 이용하여 난삭재의 표면에 유연성을 부여하고 공구의 마모를 현저히 감소시키기 위한 하이브리드 기계가공,[15] 초음파 및 지립을 활용한 피니싱 공정의 동시구현 [16] 등 여러가지 하이브리드 가공방법이 개발되고 있다.

이러한 하이브리드 가공을 구현하기 위한 시스템은 대부분 기존의 가공시스템에 하이브리드화를 위한 부가장치를 부가하는 형태로 진행되고 있다. 부가장치는 대부분 가공헤드부와 컨트롤 부로 구성되며, 가공헤드부는 대부분 회전스핀들, 가공공구, 이송스테이지, 회전스테이지 등의 기계적 장치로 구성된다 부가적으로 열, 전기, 화학 등의 복합공정을 위한 가공환경의 제어 또한 필수적 요소이다.

따라서 일련의 시스템 형식으로 개발되기 보다는 기존시스템의 간단한 수정을 통한 개발이기 때문에 가공기술의 확보가 우선된다면 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

3. 마이크로/나노 하이브리드 생산시스템

기존의 대형 공작기계의 제작비용에 비하여, 대형 공작기계를 하이브리드 가공기술에 맞추어 제작하기 위해서는 시간적, 공간적, 경제적 비용이 우선적으로 추가 투자되어야 한다.

하나 이상의 가공방법이 추가되면서 고려해야 할 사항은 시스템부, 환경부, 제어부 등의 여러가지 요소에 대한 새로운 개념의 설계가 필수적이다. 따라서 기존의 대형공작기계의 경우에는 적절한 부가장치 즉, 고속회전 스핀들 시스템, 초정밀 스테이지, 공구 등의 부가장치를 부착하여 다양한 하이브리드 가공을 수행하는 것이 경제적일 수 있다.

이러한 생산시스템은 초기에는 대량생산을 통한 가격경쟁력 향상에 초점이 맞추어 졌으나 점차 소비자의 욕구가 다양해지면서 새로운 개념의 생산시스템에 대한 필요성이 요구되었다.[1,4,5] 산업혁명 이후 공작기계 산업의 급속한 발전에 이어서, 특정한 부품의 생산만을 위한 DMS (Dedicated Machining System), 다품종 소량생산에 적합한 하드웨어 재구성형 FMS (Flexible Manufacturing System), FMS 에 소프트웨어적 재구성까지 포함하는 포괄적 의미의 RMS (Reconfigurable Manufacturing System), RF (Reconfigurable Factory) 형태까지 진보되어 왔다. (Fig. 3) Reconfigurable 생산시스템은 소품종 소량생산에도 적합한 생산시스템으로 이러한 생산시스템의 특징은 소비자가 주도하는 시장 에 빠른 대응성을 갖는 장점이 있다.

이러한 RMS 는 초소형 기계 시스템에서 RMT (Reconfigurable Machine Tool)[17] 의 형태로 연구되어지고 있는데, 이는 공작기계 시스템 각 요소를 모듈화 시켜 기계자체의 재구성을 통한 다양한 가공

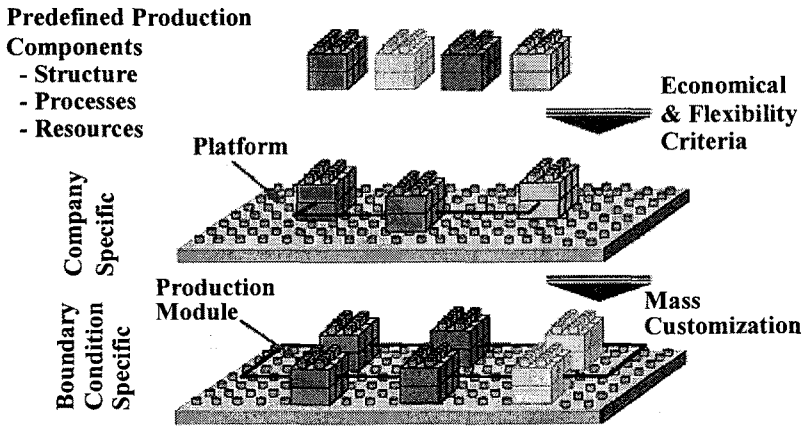

Fig. 3 Reconfigurable μ-factory concept[5]

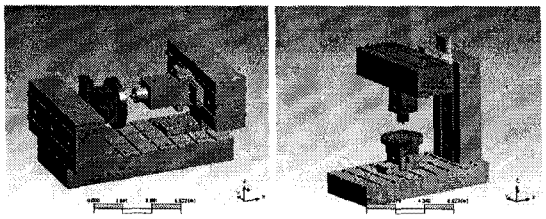

Fig. 4 Example of feasible RMT configurations

방법을 가능하게 하는 개념이다. (Fig. 4) 특히, 최근에는 초소형 공작기계를 제작하고, 이들을 원하는 목적에 맞게 재구성하는 초소형 공장 개념의 마이크로 팩토리 (Micro Factory) 시스템이 대두되고 있다.[18] 기존의 대형 공작기계를 일련의 프로세스에 맞게 재구성하기는 거의 불가능하기에, 다품종 초소형 부품을 생산하는 것을 목적으로 하는 초소형 포터블 공작기계의 개발은 공작기계 분야에 새로운 가능성을 제시하고 있다.

Fig. 5 는 이러한 마이크로 팩토리의 개념을 나타낸 것으로, 절삭가공, 소성가공, 특수가공, 검사 시스템 및 조립/제어 시스템으로 구성된 일례이다. 마이크로 팩토리는 소형부품을 고정밀도로 가공하기 위한 초소형 공작기계 (mMT, micro Machine Tool) 의 개발이 활발히 이루어지면서, 초소형 공작기계를 조합한, 소형공간에서의 공장을 만들어 보고자 시도된 개념이다.

이들은 대형 공작기계에 비하여 이동 및 조합이 용이하기 때문에 통합제어 시스템에서 적절한 지령을 가하게 되면 각 공정에 적합한 초소형 공작기계의 재배열이 이루어지게 되어 원하는 공정을 완성 할 수 있게 된다.

초소형 기계가공 시스템에서는 이송계, 주축부, 공구부, 시스템 구조부 등의 모든 모듈이 소형화 되어야 할 뿐 만 아니라, 그에 상응하는 상대적 정밀도를 유지하기 위하여 서브마이크로 급의 분해능과 강성 등을 보유하고 있어야 한다.

일례로, 초소형 공작기계에서는 가공공구의 직경이 미세하기 때문에, 대형 공작기계에서와 동일한 가공성능을 발휘하기 위해서는 초소형 고속회전 스핀들의 개발이 필수적이다.

Fig. 6 은 초소형 공작기계용 300,000 rpm 급 초소형 스핀들을 나타낸 것으로, 현재 국내외적으로 다양한 연구가 진행되고 있다.[18] 또한 이들 공작기계에 다소 부가장치를 추가하게 되면 초소형 하이브리드 공작기계의 역할을 수행 할 수 있는 가능성은 충분하다.

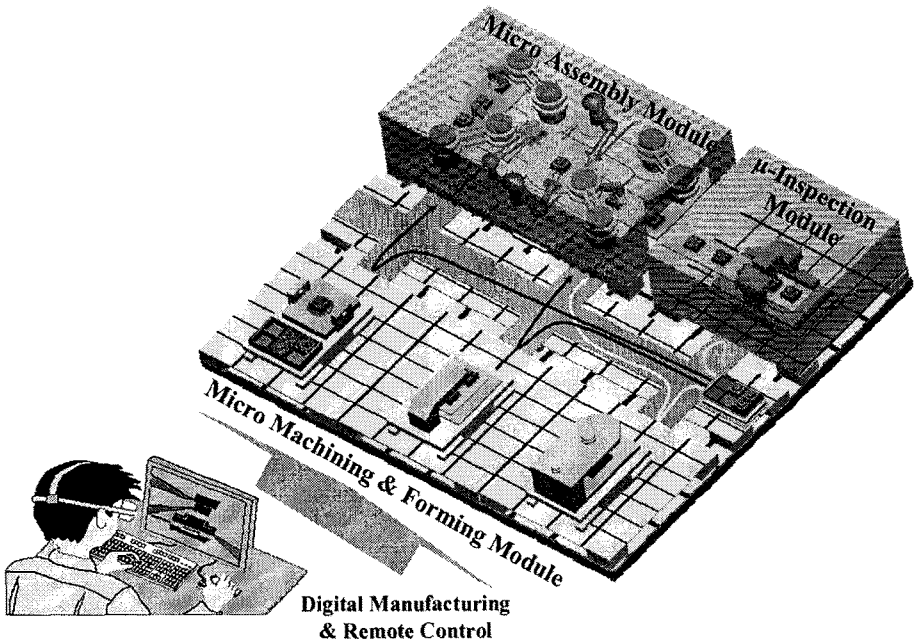

Fig. 5 Concept of Microfactory System

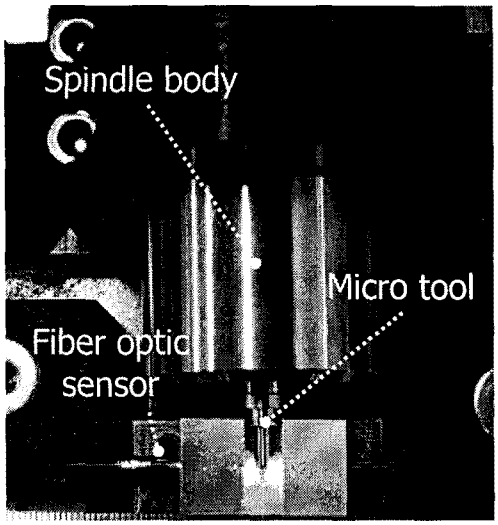

Fig. 6 Miniaturized Spindle for mMTs

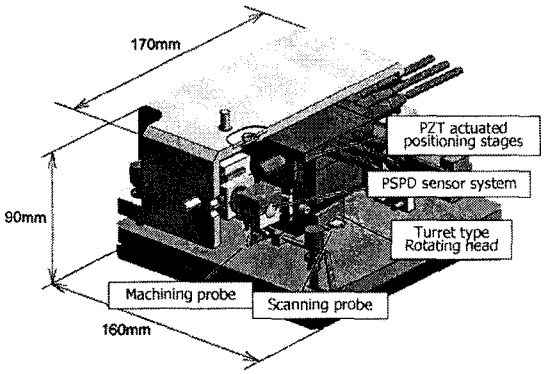

Fig. 7 AFM-based Hybrid Nanomachining & Measuring System with Turret Head

상기의 마이크로 하이브리드 가공을 수행하기 위한 초소형 공작기계의 개발과 함께 나노급 기계가공을 위한 하이브리드 시스템의 개발도 국부적으로 이루어지고 있다. 이들은 주로 나노급 측정기의 메커니즘을 이용하여 마이크로뉴턴 이하의 가공력을 바탕으로 경질 공작물을 가공하는 방식이다. Fig. 7 은 AFM (Atomic Force Microscope) 형식의 나노 측정기 시스템에 터렛 (Turret) 형식의 일반공작기계 공구교체방식을 도입하여 가공과 측정을 하나의 시스템에서 수행하는 하이브리드 시스템이다.[19] 또한 서브마이크로 가공영역에서 두가지 공정을 동시에 수행하는 방법으로서는 Fig. 8 과 같은 기계가공과 화학적 에칭을 동시에 수행하여 3 차원 구조물을 형성시키는 AFM 기반의 하이브리드 시스템도 소개되었다.[20]

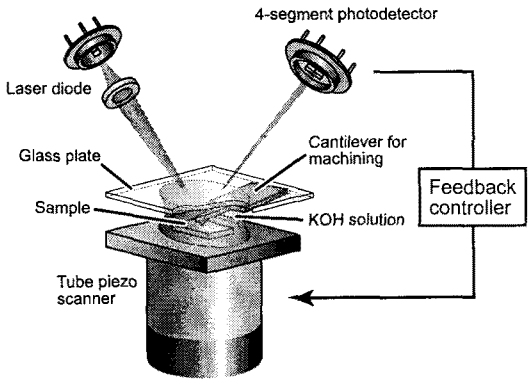

Fig. 8 Mechano-Chemical Hybrid Nano Manufacturing System (Tribo-nanolithography system)

4. 결론

여러 공정을 하나의 시스템에서 동시에 수행하기 위하여 개발된 하이브리드 가공기술 및 시스템은 최근 이슈화되고 있는 하이브리드 자동차와 더불어 세계적으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 상당히 진보된 하이브리드 가공기술에 비하면 하이브리드 공작기계기술은 아직 걸음마단계에 지나치지 못하고 있다. 가솔린, 디젤엔진 자체의 연비 향상에만 몰두해오던 대형 자동차기업들이 최근의 하이브리드 자동차 양산기업들에 크게 뒤쳐질 수밖에 없는 것은, 공작기계에 있어서도 유사한 결과를 낳을 수 있다고 볼 수 있기에, 시급한 기술개발과 정책적 지원이 필수적이라 할 수 있다.

후 기

본고는 지식경제부와 NCRC 의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Mehrabi, M. B., Ulsoy, A. G. and Koren, Y., "Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing," Journal of Intelligent manufacturing, Vol. 11, No. 4, pp. 403-419, 2000.
2. Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Burrows, J. M., Paul,

M. A. and Davies, B. J., "Hybrid High Speed Machining (HSM): System Design and Experimental Results for Grinding/HSM and EDM/HSM," CIRP Annals, Vol. 50, No. 1, pp. 145-148, 2001.

3. Koren, Y., Jovane, F., Heisel, U., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, A. G. and Van Brussel, H., "Reconfigurable Manufacturing Systems," CIRP Annals, Vol. 48, No. 2, pp. 6-12, 1999.
4. Ni, J., Lee, S. H. and Lim, B. S., "Reconfigurable Manufacturing Systems and Performance Monitoring in Microfactory," Proc. of 3rd IWMT, pp. 43-49, 2007.
5. Song, J. Y., Lee, C. W. and Ha, T. H., "Development of assembly and control for reconfigurable μ-factory," Proc. of 1st IWMT, pp. 33-38, 2005.
6. Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., Wise, M. L. H. and Oxley, I. A., "Polycrystalline Diamond Edge Quality and Surface Integrity following EDG," Proc. of the Int. Conf. of AMPT, Dublin, pp. 1921-1933, 1993.
7. Hill, C. P. R., Watkins, J. R., Ray, C. and Ray, S., "Method and Apparatus for Grinding," European Patent, Application No. EP19980310212, 2004.
8. Kozak, J., Rajurkar, K. P. and Wang, S. Z., "Material removal in EDWM of PCD blanks," J. Eng. Ind. (Trans. ASME), Vol. 116, No. 3, pp. 363-369, 1994.
9. Kozak, J. and Oczo, K. E., "Selected problems of abrasive hybrid machining," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 109, No. 3, pp. 360-366, 2001.
10. Pajak, P. T., De Silva, A. K. M., McGeough, J. A. and Harrison, D. K., "Modelling the aspects of precision and efficiency in laser-assisted jet electrochemical machining (LAJECM)," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, No. 1-3, pp. 512-518, 2004.
11. Ohmori, H. and Nakagawa, T., "Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels," Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 287-290, 1995.
12. Schöpf, M., Beltrami, I., Boccadoro, M., Kramer, D. and Schumacher, B., "ECDM (Electro Chemical Discharge Machining), a New Method for Trueing and Dressing of Metal Bonded Diamond Grinding Tools," CIRP Annals, Vol. 50, No. 1, pp. 125-128, 2001
13. McGeough, J. A., Khayry, A. B. M., Munro, W. and Crookall, J. R., "Theoretical and Experimental Investigation of the Relative Effects of Spark Erosion and Electrochemical Dissolution in Electrochemical ARC Machining," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 1, pp. 113-118, 1983.
14. Khairy, A. B. E. and McGeough, J. A., "Die Sinking by Electroerosion-Dissolution Machining," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 191-195, 1990.
15. Wang, Z. Y., Rajurkar, K. P., Fan, J., Lei, S., Shin, Y. C. and Petrescu, G., "Hybrid machining of Inconel 718," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 13, pp. 1391-1396, 2003.
16. Kozak, J. and Oczo, K. E., "Selected problems of abrasive hybrid machining," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 109, No. 3, pp. 360-366, 2001.
17. Choi, Y. H., Park, H. M., Jang, S. H. and Park, J. K., "Configuration Creating Method of Modular-Reconfigurable Machine Tool Using Quadratic Form of Posture Vectors," Proc. of 1st IWMT, pp. 77-80, 2005.
18. Park, J. K., Lee, N. K., Lee, S. J., Lee, D. W. and Song, J. Y., "Development of Microfactory Systems for the Next Generation," Proc. of 3rd IWMT, pp. 5-12, 2007.
19. Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S. Takano, N., Oyama, T., Inagaki, K. and Saito, J., "Development of 3D Nano-Machining and Measuring System," JAIST Int. Symp. on Nano Technology, 2003.
20. Park, J. W., Kawasegi, N., Morita, N. and Lee, D. W., "Tribo-Nanolithography of Silicon in Aqueous Solution based on Atomic Force Microscope," Appl. Phys. Lett., Vol. 85, No. 10, pp. 1766-1768, 2004.