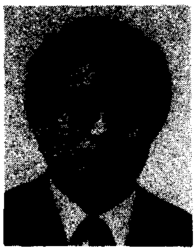

경취재료(硬脆材料)의 경면연삭 현황과 향후개발동향

The Present and Future Trend of Development for Mirror Surface Grinding of Brittle Materials

金　政　斗*
Kim, Jeong Du

1. 머리말

최근, 정보통신, 항공우주 및 신소재 산업의 표면가공기술에 대한 요구가 높다. 특히 경취재료를 고정밀도로 다듬질 하여 높은 품질의 제품이 되도록 요구되고 있으며, 경취재료라 불리우는 반도체 웨이퍼, 페라이트, 파인 세라믹, 초경 금형, 광학렌즈, 복합재료 등의 경면가공을 완성함으로서 고부가가치를 창출하게 된다. 그러나, 경취재료는 가공시 미세크랙 및 칩핑등이 생기는 매우 가공이 어려운 제품으로서, 종래의 가공법으로는 일반적으로 절삭가공, 연삭가공, 래핑, 폴리싱등의 다공정으로 행하여 짐으로서 생산능률이 극히 떨어질뿐 만 아니라 미세 연마지립입자에 의한 자연환경 보존에 나쁜 영향을 미치고 있다. 따라서, 생산성 향상 및 가공환경 개선을 목적으로 경면연삭가공으로 대체시키는 방법이 활발히 개발되고 있다. 경면연삭은 가공시 운동정밀도가 그대로 가공물에 전사되는 운동전사방식의 대표적인 가공법으로서 기존의 연삭에서 가공단위를 서브마이크로미터(sub-micrometer) 이하로 억제하는 것이 곤란하였기 때문에 취성 파괴를 유발하는 가공이 되어, 래핑 및 폴리싱이라는 미세숫돌입자를 사용하여 부가압력을 제어하는 크랙현상이 없는 경면가공이 불가결하였다. 그러나, 최근에는 시스템의 고강성화, 이송기구, 위치결정기구의 초정밀화, 초미세화가 가능하게 된 한편, 초지립 다이아몬드 숫돌이나 드레싱 기술이 고도화 되었기 때문에 서브마이크로미터 이하의 가공단위 연삭 즉, 취성파괴를 동반하지 않고 소성변형에만 기초한 연성모드 경면연삭이 가능하게 되었다. 그림 1은 경면연삭가공의 범위를 나타내고 있는 것으로서 초정밀 경면 연삭가공이 경면다듬질의 대명사로 알려져온 래핑의 수준을 능가하게 되었다. 그리고, 최근에는 초지립(superabrasive)다이아몬드와 입방결정 질화붕소(CBN) 숫돌을 경제적으로 제작이 가능하게 되어 경면연삭이 보편화의 추세로 가고 있으나, 첨단 경취재료의 최종적으로 제품화하는 경면연삭 기술은 그림 2에서 보는 바와 같이 시스템의

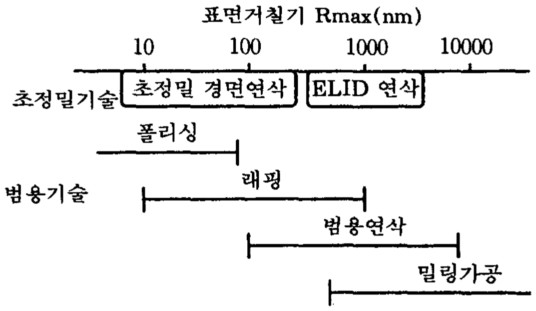

그림1. 경면연삭가공의 범위

* 기계제작기술사, 한국과학기술원 정밀공학과 교수

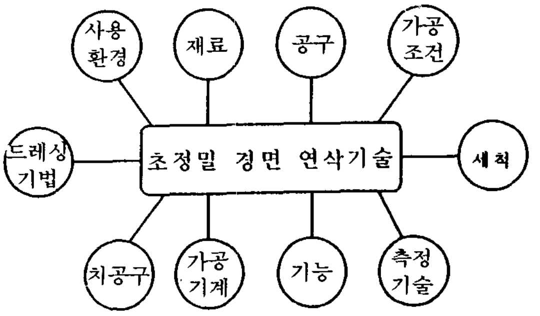

그림2. 초정밀 경면 연삭기술의 구성

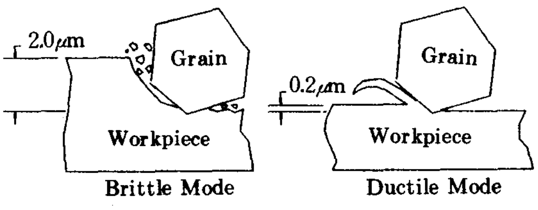

그림3. 취성모드와 연성모드 연삭모델

복합기술 및 초정밀급 장비가 필수적으로 요구되어지며, 가공기계의 구조, 공구, 재료, 드레싱의 새로운 기술 및 측정기술등이 상호조화있게 구성되어야만 경면연삭이 달성되어 진다.

2. 연성모드 연삭

경취재료의 경면연삭을 달성하기 위한 연성모드 연삭 즉, 숫돌절삭깊이량을 연성 연삭이 가능한 임계절삭깊이 이하로 설정할 수 있는 충분한 기계 강성을 연삭기가 갖게 하여, 숫돌흔들림과 이송분해능을 다같이 임계절삭깊이 이하로 억제하고, 숫돌입자와 돌출 절삭날 높이 및 분포도를 임계값 이하로 조절할 수 있다면, 임계절삭깊이의 크기보다 큰 숫돌입자지름을 갖는 숫돌을 사용한다고 하더라도 연성모드의 초정밀 경면연삭이 가능하다. 그림 3에서 보는바와 같이 경취재료 연삭시 취성모드에서는 재료의 파손현상이 발생됨으로서 경면연삭이 불가능하며, 연성모드에서만 재료면의 손상없이 깨끗한 절삭이 이루어져 경면연삭을 달성하게 된다. 최근 연성모드 연삭가능성을 최초로 실증한 관록할 만한 연구결과들이 발표되고 있으며, 연성모드 연삭 달성을 위한 시스템구성은 유정압안내와 동압미끄럼안내를 조합시킨 복합안내에 의한 운동기준면을 1면만으로 하는 고강성이송 기구를 구성하였다. 숫돌헤드나 테이블의 자중, 구동시의 마찰력, 연삭저항등에 대항하여 고분해능의 스텝이송을 가능케 하는 부하보상기구와 숫돌헤드 주축을 고정하여 정압베어링지지로 숫돌유닛만을 회전시키는 방식인 직동형태(bulit-in type)등의 독특한 초정밀 고강성기구를 개발하여 이송분해능 10nm의 연삭기구를 실현하고 있다. 연삭기 자체가 외팔보라는 구조적인 단점을 갖고 있음에도 불구하고, 숫돌과 테이블간의 페루프(closed loop) 강성은 15Kgf/μm 이상이며, 종래의 고강성연삭기와 비교하더라도 몇배이상의 고강성화가 실현되었으며, 이와 같이 강성면에서 안정된 초정밀급 연삭기를 사용하여 임계절삭깊이 이하의 연성모드 경면연삭이 가능하게 되었다. 고강성의 연삭기 구성후 경취재료의 안정된 연성모드 가공을 위해서 연삭깊이를 서브마이크로미터 수준까지 정밀한 제어가 필수 불가결하여 압전구동 연삭깊이 미소이송장치가 부가되어야 하며, 미소한 연삭깊이 제어로 인한 정밀한 경면 연성모드 연삭가공이 실현되고 있다.

3. 고속 연삭

최근에 각광받고 있는 새로운 개념의 연삭가공 기술은 2가지로 크게 구분되어지며, 하나는 초정밀연삭 기술이고, 또하나는 고속연삭 기술이다.

고속화 달성으로 인하여 각종 경취재료의 능률연삭을 실현하고, 경면연삭의 수준까지 성능을 향상하는 것이 또 다른 연삭의 개념이다. 연삭능률을 높이는데 공작물의 속도나 숫돌의 절

삭량을 크게하면 되나, 연삭저항이 필연적으로 증가되어 가공면에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서, 숫돌원주속도를 증가하여서 즉, 공압 베어링 장착에 의한 고속회전으로 숫돌주속을 향상시켜서 연삭저항의 증대를 억제하고, 고속가공 및 경면연삭을 달성하고자 하는 것이다. 고속연삭에 의해서 고능률을 실현하고자 하는 것은 과거로부터 연구되어 오고 있었으며, 60년대 초기에서 중기에 걸쳐 소련이나 서독등에서 60m/sec~90m/sec로 실험이 행하여져 60년중반에는 실용화를 위하여 제작된 연삭기가 속속 출현 하였으나, 실제 실용적인 면에서는 60m/sec로 한계점을 나타냈다.

그러나, CBN 및 다이아몬드 숫돌의 출현으로 90m/sec를 넘는 고속화의 연삭가공이 가능하게 되었으며, 현재 초지립 CBN 및 다이아몬드 숫돌을 이용하여 세라믹스등 경취재료 정밀연삭이 실용화되고 있는 상황이다.

숫돌 고속화의 최대장해는 숫돌의 파손이며, 회전파괴강도가 큰 숫돌의 설계가 매우 중요하게 되었다. 고속화를 위해서 숫돌의 센터구멍을 없애고, 숫돌의 림(rim)두께를 얇게 하였으며, 재질의 중량이 매우 중요하여 티타늄, 알루미늄 합금보다 경량인 복합재료로 사용하는 개발이 활발히 이루어지고 있다.

또한, 고속 회전중 숫돌의 공진도 문제가 되어, 숫돌의 고유진동수가 회전시 주파수보다도 커지도록 요구되어지고 있다. 고속회전시 주축회전부의 발열등의 문제점이 대두되고 있어서, 비접촉 구조를 갖는 공압베어링의 적용이 필수적으로 되었다. 고속연삭은 현재 진척단계에 있고, 일부는 적용단계에 있으나 상용화에 아직 문제점이 있으며, 고속상태에서 연삭기와 숫돌입자의 현상이 명확히 판명되지 않았으나, 현재 고능률가공을 위한 고속화를 실현하고자 많은 과제가 남아있다.

4. 연속 전해드레싱

신소재의 경취재료 경면연삭가공을 장시간

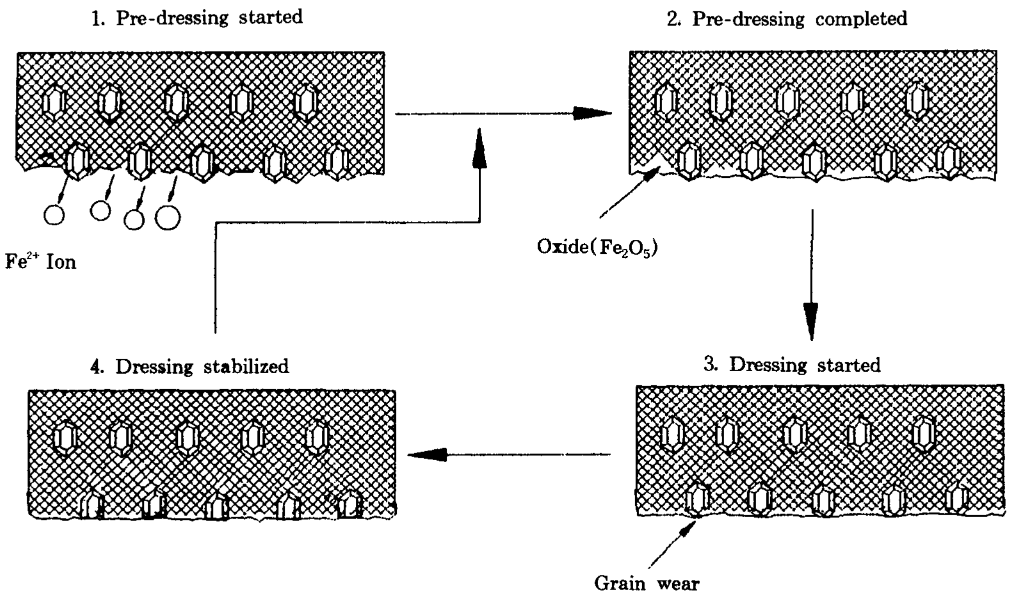

그림4. 연속 전해드레싱의 원리

안정적으로 지속하기 위해서는 숫돌의 눈메움과 날무디어짐을 방지하고, 숫돌입자의 돌출높이를 항상 일정하게 유지시키는 것이 필수적이다. 특히, 초지립의 다이아몬드, CBN 숫돌은 눈메움(loading) 및 날무디어짐(glazing)이 발생하기 쉬움으로서 새로운 숫돌입자를 생성시키는 방법인 드레싱을 하는 것이 바람직하다. 따라서, 금속결합제로 된 초지립 숫돌을 최적으로 드레싱하는 방법으로 제시된 것이 전해드레싱이다. 금속결합제로 된 초지립 숫돌은 원래 드레싱이 곤란하여 연속적인 연삭작업에는 부적합한 것으로 되어 왔으나, 전해드레싱에 의해서 수 마이크로미터의 미세 숫돌입자라도 적정하게 드레싱을 할 수 있게 되었다. 더욱이 전해드레싱을 연속적(in-process)으로 하여 눈메움과 날무디어짐을 방지하여 경면연삭을 달성하게 되었다. 그림4는 연속 전해드레싱의 원리를 나타낸 것으로서, 양극은 숫돌면에 연결하고 음극은 전극에 설치하여, 이 사이에 수용성 연삭액을 통과시켜 펄스형 전원이 공급됨으로서 전해드레싱이 이루어진다. 숫돌과 전극 사이에 일정시간을 통전하면 숫돌의 금속결합제가 일정량 전기분해하여 새로운 숫돌입자가 생성되어 진다. 이 전기분해작용에 의해서 금속결합제가 철이온으로 화학작용되어 산화철화 됨으로서 숫돌표면에 붙게되어, 절연이 되고 숫돌의 도전성에 따라 전해전류가 감소되는 추세로 된다. 초기 연삭없는 드레싱(pre-dressing) 후 연삭을 개시하면 숫돌입자의 마멸과 더불어 숫돌입자표면의 절연피막이 제거되어 절연층이 얇아짐으로서 일단정지하고 있던 전해가 재개되어 마멸된 숫돌입자가 제거됨으로서 드레싱이 연속적으로 된다. 이때 전기분해가 발생되면 또 절연생성물에 의해서 전류의 저하가 발생되고, 과용출을 방지한다. 즉 가공에 기여한 마멸된 부분만이 전해드레싱되어 항상 새로운 연삭날이 유지되고 안정화됨으로서, 연삭저항을 감소시키고 표면거칠기면에서 양호한 효과를 나타내고 경면생성을 용이하게 된다. 그림 5는 연속 전해드레싱의 구성을 나타낸 것으로서 전해드레싱 전용숫돌, 전극, 펄스발생전원, 전해액노즐로 이루어져 있으며, 전극의 크기는 숫돌원주면의 약 1/5정도이고, 숫돌과 전극사이의 간극은 약 0.1~0.3mm를 유지하면 된다. 전해드레싱 전용 경면연삭용 금속결합제 숫돌은 주철본드, 숫돌, 코발트본드 숫돌, 전착숫돌 등이 사용되며, 이러한 연속 전해드레싱을 달성함으로서, 세라믹스, 반도체 웨이퍼, 자기헤드 재료등 경취재료의 경면연삭을 완성하게 된다. 또한, 최근에 경취재료의 경면연삭을 항상 일정하게 유지하도록 하는 컴퓨터제어에 의한 최적 연속전해드레싱 시스템(그림 6)이 개발되었으며, 이를 적용한 실예로 경취재료중 하나인 초경재료를 경면연삭 한 것

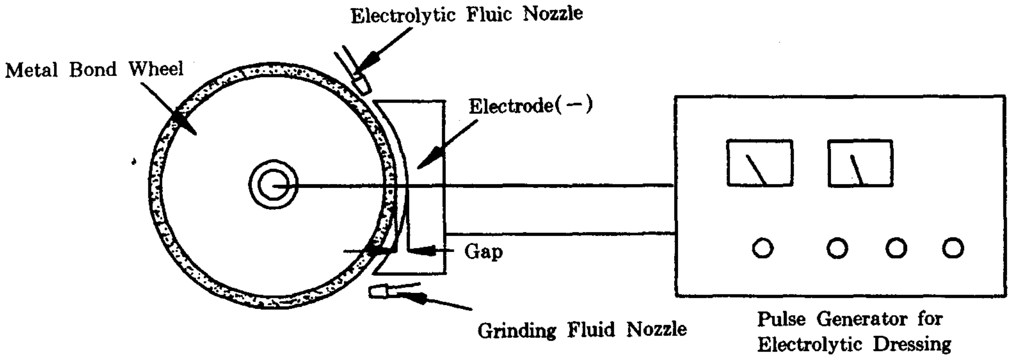

그림5. 연속 전해드레싱 장치의 구성

이 그림 7에 나타나 있다.

최근 연속 전해드레싱이 실용화 완성단계로, 초정밀 경면연삭의 달성에 필수불가결한 기술이 되었으며, 점차 자동화 제어되는 추세로 가고 있다. 종래, 숙련작업자의 직감과 경험에 의해서 드레싱 및 가공되는 연삭작업이 전해드레싱 방법에 의해서 연속적인 최적드레싱이 됨으로서 커다란 변화가 생겼으며, 각종재질과 숫돌입도, 가공방식, 가공정밀도에 따라 적용이 가능한 고능률 연삭으로 래핑 및 폴리싱 작업을 대체하는 경면다듬질의 위치를 구축하고 있다.

5. 결론 및 향후동향

현재 경취재료의 경면연삭 기술분야에 관한 연구는 나노미터(nm) 단위를 넘어 Å단위급의 초정밀에 도전하고 있으며, 연삭기 주축에 공압베어링의 장착을 통한 고속화, 연속 전해드레싱에 의한 숫돌의 최적드레싱, 초지립 다이아몬드 CBN 숫돌 가공기술, 공작기계의 고강성 유지와 외부진동의 방지, 연성모드가공을 위한 압전구동을 의한 미소이송등이 복합적으로 구성되어야 경면연삭이 달성된다.

앞으로 경면연삭가공의 추세는 전기 전자 산업용 단순성형과 소결제품위주의 세라믹스부품과 각종 고부가가치 경취재료 성형으로부터 탈피하여 고능률, 고정도의 가공을 요하는 기계요소 및 구조형 부품으로 경면가공품의 추세가 급증하게 될 것이며, 자동차와 항공산업의 지속적인 발전, 금형산업분야 및 프린터 복사기헤드 등 전장품의 경면가공, 신소재의 절삭공구의 개발등이 성공적으로 이루어지기 위해서는 경취 난삭재의 경면 연삭이 견제되어야 할 것이다.

이러한 경면 연삭 가공 달성을 위한 향후동향은,

첫째 고속화, 초미세화 연삭가공의 요구에 따라 고속회전이 가능한 공압베어링 장착에 의한 CNC 연삭기와 고강성 연삭기의 개발 방향으로 발전될 것이다.

둘째, 경취재료 경면 연삭용 초지립 숫돌의 개발이다. 초지립 다이아몬드와 CBN 숫돌은 경면 연삭에 우수한 효과를 나타내고 고능률 연삭에서는 필수 불가결한 숫돌이라고 여겨지지만 공구비가 높기 때문에 이에 대체할 수 있는 보다 저렴한 가격의 경면 연삭용 숫돌 개발

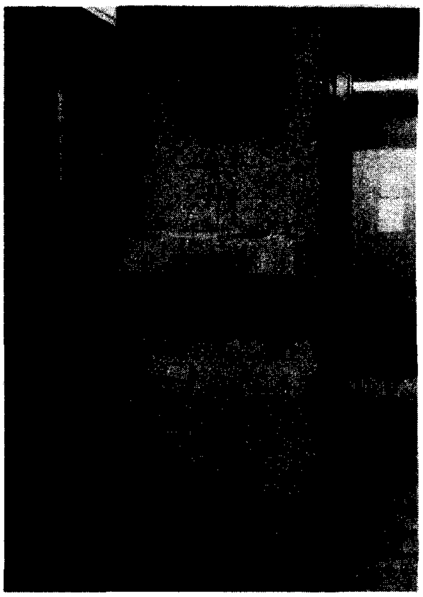

그림 6. 최적 연속 전해드레싱 시스템 (KAIST-KSECS-1)

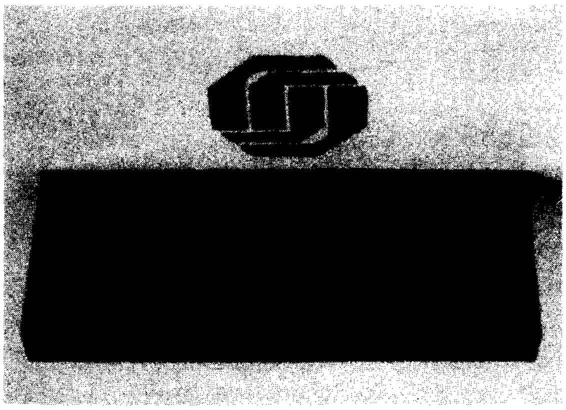

그림 7. 연속 전해드레싱을 채용한 경취재료 경면가공 실예(초경합금, P20)

이고, 고능률 경면 연삭을 위한 다이아몬드와 CBN 숫돌의 성능 향상이라는 개발목표를 추구하고 있다.

셋째, 경면연삭 달성을 위한 최적드레싱 기법의 발전으로서, 연속적인 전해드레싱이 현재 매우 양호한 효과를 나타내고 있으나, 숫돌소모에 따른 간극증가 등 여러 연삭조건에 최적적으로 대처하지 못하는 결점으로 인해서, 안정적인 드레싱을 추구하는 센서(sensor)적용 및 컴퓨터 제어에 의한 최적화 드레싱 기법의 발전으로 더욱 가속화 될 가능성이 크다.

넷째, 신소재와 경취 난삭재의 경면연삭에 관한 신기술의 발전이다. 파인 세라믹스, 무기질계 복합 재료, 항공 우주 관련의 고내열 합금소재 등 신소재 출현에 대한 고능률 경면연삭의 필요성이 매우 부각되어지고 있으며, 기존 경면 다듬질인 폴리싱 및 래핑등 생산저하 공정의 단축을 위한 경면연삭 신기술 개발에 박차를 가하게 될 것으로 예상되어진다.

향후 신소재 및 경취재료의 부품 가공정밀도는 서브마이크로미터가 일반정밀도가 될 것이며, 그것에 대응하여 향후 10년 후의 경면연삭 가공의 기술의 진보발전은 보다 고정도의 경면연삭 달성과 초고속화의 양면에서 장족의 진보와 발전이 예상된다.

참 고 문 헌

1. A. B. Groenou and J. D. B. Veldkamp, 1979, "Grinding Brittle Materials", Philips Technical Review, Vol, 38, pp.131-144.
2. 大森整, 1991, Elid 鏡面研削技術, Elid 研削研究會, pp.8-31.
3. R. Komanduri and W.R.Reed, 1980, "A New Technique of Dressing and Conditioning Resin Bonded Superabrasive Grinding Wheel", Annals of the CIRP, Vol.29, pp. 239-243.
4. H. Ohmori and T. Nakagawa, 1990, "Mirror Surface Grinding on Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing", Annals of the CIRP Vol. 39, pp.329-332
5. K. Suzuki and T.Uematsu, 1991, "Development of a Simplified Eletrochemical Dressing Method with Twin Electodes", Annals of the CIRP, Vol.40, pp.363-366.
6. 김정두, 이연종, 이창열, 1993, "전해드레싱에 의한 경취재료의 초정밀 연삭에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 6, pp. 1486-1496
7. S. Malkin, 1971, "The Wear of Grinding Wheels Part 1-Attritious Wear", Transactions of the ASME, pp.1120-1128
8. Thomas G. Bifano, 1984, "Ductile-Regime Grinding of Brittle Materials", Precision Engineering Center North Carolina State University, NG 27695-7918, pp.325-338
9. 김정두, 1992, 초정밀가공공작기계(연삭기)의 개발에 관한 연구(Ⅲ), 과기처, 특정연구보고서
10. Geoffrey Boothroyd, 1975, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tool, pp. 229-233.
11. C. Y. Jiang, Y. Z. Zhang and H. J. Xu, 1987, In-process Monitoring of Tool Wear Stage by Frequency Band-energy Method, CIRP, Vol. 36
12. Shuhei Takasu, Masami Masuda, Takashi Nishiguchi, 1985, Influence of Steady Vibration with Small Amplitude upon Surface Roughness in Diarnond Machining, CIRP, Vol. 34, 1985.
13. G. M. Zhang, S. G. Kapoor, 1991, Dynamic Generation of Machined Surfaces, Part 1 ; Description of a Random Excitation System, Part 2 ; Construction of Surface Topography, ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 133.
14. S. M. Pandit, S. Revach, 1981, A Data Dependent Systems Approach to Dynamic of Surface Generation in Turning, ASME, Joumal of Engineering for Industry, Vol. 103.
15. J. D. Kim, 1993, A Study on the Mirror Surface Grinding for Brittle Materials with Inprocess EDM Dressing, 5th International Grinding Conference & Exposition, Cincinneti, Ohio, USA.