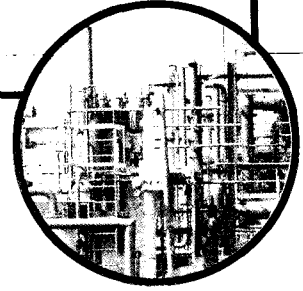


특수가공기술의 최신동향

New Trends of Non-Traditional Machining Technology



글 / 金 政 斗

(Kim, Jeong Du)
기계제작기술사, 공학박사,
세종대학교 기계·항공우주공학부 교수.
E-mail: jdkim@sejong.ac.kr

Workpiece materials may be relatively easy to machine by traditional methods but workpiece geometry also may be a constraint. Many shapes that are geometrically difficult to handle conventionally may be candidates for nontraditional processes.

Nontraditional processes provide new opportunities for product design innovation and productivity improvements.

Difficult-to-machine materials of geometric shapes difficult to produce with traditional equipment and tooling, may often be easily and cost effectively machined using nontraditional processes.

Nontraditional machining processes are relative newcomers to the manufacturing arena. Nontraditional chemical solutions, or even electrolytic current as the working medium rather than a conventional cutting tool or abrasive to remove or shape materials.

1. 서론

근래의 옵트메카트로닉스(optomechatronics) 부품의 성능을 충분히 발휘하기 위해서는 목적에 맞는 다양한 기능성재료를 소정의 형상과 정도에 따라 경면상태로 가공이 요구된다. 최근의 경면가공기술은 다종의 에너지를 응용한 새로운 복합가공공정으로 발전되고 있으며, 이것은 고능력, 고정밀가공의 양산화를 실현하여 제품의 품질을 획기적으로 개선하고자 하는 산업사회의 요구를 기존의 가공법으로는 만족시키기 어렵기 때문이다.

본고에서는 경면가공을 위한 최근의 특수가공기술의 개발과 응용에 대하여 기술하였다.

2. 방전경면

방전가공은 주로 기름이나 물 등의 액중에서 발생하는 펄스방전을 이용하여 재료를 제거하는 가공법이다. 근래에 와서 액중의 펄스방전을 표면거칠기 개선에 적용한 사례들이 발표되고 있다.

방전가공에서 $1\mu\text{m}$ $R_{\text{max}} \sim 0.5\mu\text{m}$ R_{max} 정도의 경면을 얻을 수 있으며, 일례로 실리콘전극을 사용하여 강재를 가공하는 경우 전극면적이 큰 경우라도 다듬질면 거칠기가 획기적으로 개선된다. 응용 일례로 SUS304(18Cr-8Ni강), 13Cr강, SKH-51 고속도강, SKD11 등의 표면에 실리콘전극으로 방전 가공할 경우 경면효과가 대단히 크다.

실리콘전극으로 방전하면 평탄상의 가공은 가능하나 3차원 형상의 방전가공에는 여러 가지 제약조건이 따르게 된다. 또한 실리콘전극은 통상적인 동전극에 비하여 수십 내지 수백 배의 전극소모가 많아져 생산효율성에 문제가 있다. 따라서 최근에 관심을 갖는 경면방전가공법으로 가공액 중에 20g/l 정도의 금속실리콘분말을 혼입하여 방전조건 $I_p=1\text{A}$, $Z_p=Z_r=2\mu\text{s}$ 로 동전극을 마이너스극에서 방전가공을 하여 미려한 가공면을 얻는다. 실리콘분말혼입에 의한 방전가공표면은 금속조직

에 따라 광택도가 다르게 얻어진다. 금속조직이 마르텐사이트, 오오스테나이트인 경우는 경면광택을 손쉽게 얻을 수 있으나, 초경합금, 도전성파인 세라믹스, 서어메트 등은 경면상태가 어렵다.

그래파이트 전극을 사용한 경우도 일반가공유종에서 전극면적이 적을 때 $6\sim 8\mu s$ Rmax 정도의 표면거칠기를 얻을 수 있으나 분말혼입방전가공을 적용하면 100cm^2 정도의 대면적에도 $0.5\mu m$ Rmax 정도의 경면가공이 가능하다.

3. 경면연마가공

옵트메카트로닉스(optmechatronics) 부품의 성능을 충분히 발휘시킬 수 있는 것은 대상부품의 다종다양한 기능성 재료를 목적으로 하는 소정의 형상, 정도로 가공하고, 물성적으로도 만족한 상태로 가능하기 때문이다.

이 기법에는 특수가공기술이 중요한 역할을 하였다. 경면연마의 가공작용을 대별하면 화학적 작용과 기계적 작용이며, 최근 주목하고 있는 가공법은 CMP(Chemical and Mechanical Polishing) 기술이다.

반도체프로세스에 가장 널리 응용되는 것은 CMP와 MCP로 NH_4F 와 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 의 혼합액으로 Cu 이온의 치환반응($2\text{Cu}^{2+} + \text{Si} \rightarrow \text{Cu} + \text{Si}^{4+}$)을 이용한 반도체실리콘(Si) 단결정의 MCP가 최초이다. 미국 IBM에서 적용한 방식은 NaOH 등의 알칼리용액에 화학반응($\text{Si} + 4\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_4\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2$)을 이용하여 Si 단결정의 MCP가 제안되었다.

실리콘웨이퍼의 표면은 고품질의 평탄도와 표면조도는 $1\sim 2\text{nmRa}$, OSF(Oxidation induced Stacking Fault)가 요구된다. 경면연마공정은 여러 단계를 행하며 제1차연마에는 고능률, 평활경면화, 제2차연마에는 OSF 표면조도과정을 거쳐 정밀세척작업으로 이어진다. 웨이퍼의 정밀세척에

는 암모니아, 염산, 과산화수소 등의 RCA 세척제로 행하며, 경면연마시 금속불순물, 파티클 등의 잔류물을 철저히 제거한다. LSI용 실리콘웨이퍼의 제1차폴리싱에는 SiO_2 계 또는 ZrO_2 계 지립으로 입경이 $500\sim 700\text{\AA}$, 가공액 pH 10~11의 알칼리성용액, 가공압력 $3\sim 8\text{N/cm}^2$ 로 가공하여 $10\sim 15\mu m$ 정도 폴리싱 제거하며, 표면조도 $20\sim 40\text{\AA Ra}$ 를 얻는다. 이어서 제2차 폴리싱가공에서는 평균지립 $100\sim 200\text{\AA}$ 를 갖는 SiO_2 계 지립으로, 가공액 pH 9~11을 가공압력 $1\sim 3\text{N/cm}^2$ 으로 폴리싱량 $1\mu m$ 이내를 제거한다. 이때 얻어지는 표면거칠기는 $10\sim 20\text{\AA Ra}$ 값이다. 최종공정으로 SiO_2 계 평균지립 $100\sim 200\text{\AA}$ 과 암모니아계 가공액을 사용하여 가공압력 1N/cm^2 이하로 $0.1\mu m$ 정도를 제거하여 경면이 완성된다.

4. 복합경면연마가공

마그네틱테이프 생산에 사용되는 초정밀 로울러는 가공표면과 진원도, 진직도 등이 만족치 못할 경우 테이프의 표면에 손상을 주거나 마그네틱테이프의 고속이송을 저해하여 생산성을 떨어뜨리는 직접적인 원인이 된다. 또한 공기스핀들과 같은 정밀 기계용 부품은 표면가공 상태가 기계의 운동정밀도를 좌우하기 때문에 표면의 경면가공이 필요한 요소이다. 현재 사용되고 있는 래핑, 폴리싱과 같은 기존의 정밀다듬질 가공법은 이와 같은 정밀부품의 가공시 최종 표면정도를 달성하기 위해 장시간 가공을 해야 하므로 생산성이 매우 떨어지는 단점을 갖고 있다. 또한 기계적 힘에 의한 가공흔적이나 피이드마크가 가공면에 존재하여 가공품의 질을 떨어뜨리는 원인이 되고 있다.

복합경면연마는 전해연마원리, 점탄성 연마제 연마원리 및 자기장의 작용원리를 복합시킨 새로운 개념의 공정을 적용함으로써 현재의 가공법에 비해 경면연마능률이 수배나 높고 기존의 가공법

에서 나타나는 공구마크나 피이드마크를 전혀 발생시키지 않는 나노미터수준의 표면거칠기를 실현하였다. 개발된 초정밀 복합 경면연마기의 가공 원리는 다음과 같다.

• **전해연마원리** : 전극(-)과 공작물(+) 사이에 전해액을 공급하고 전기를 인가하면 전해이온들이 공작물(금속) 표면에서 금속자원과 반응하여 표면을 경면으로 연마함과 동시에 피막을 형성한다. 이 피막은 공작물의 물리적 특성과 관계 없이 경도가 낮아지며 쉽게 제거되어 표면을 매우 능률적으로 경면연마한다.

• **점탄성연마원리** : 전해작용으로 공작물 표면에는 전해생성물이 석출하여 피막을 형성하고 전해이온과 공작물 표면의 접촉이 방해받게 되는데 이를 제거하여 연속적으로 전해연마 작용이 이루어지게 된다.

• **자기장 작용원리** :

① 로렌츠(Lorentz) 원리에 의해 전기장내의 이온들이 확산운동이 활발하게 되어 전해공정을 가속화시킨다.

$$F = e(E + v \times B)[N]$$

F : 로렌츠의 힘(Lorentz' force),

e : 입자의 전하, E : 전기장의 세기,

v : 입자의 속도, B : 자기장의 자속밀도

② 전해이온들이 공작물 표면에 수직하게 입사하는 경우 공작물 표면의 골부분까지 전해반응에 의한 가공이 이루어져서 표면거칠기가 악화. 자기장을 전기장에 수직하게 걸어주면 전해이온들은 로렌츠의 원리에 의해 직선운동이 아닌 나선운동 또는 원운동을 하게 되고 공작물 표면에 경사지게 입사하기 때문에 표면의 정상점에 많은 이온들이 집중하게 되어 표면거칠기를 매우 빠르게 개선시키고 최종 표면거칠기도 자기장이 없는 경우보다 우수한 표면연마가 이루어진다.

복합경면연마기의 전체시스템은 전극 및 자기장 생성부, 점탄성연마재부, 전원 및 전해액 공급부, 진동부의 네 부분으로 이루어져 있으며 전용기 또는 일반 공작기계에 손쉽게 장착하도록 되어 있다. 개발된 초정밀 복합경면연마기는 경취재료, 연성재료 등 재질에 관계없이 전도성이 있는 어떤 재료에 대해서도 고능률, 고정도 경면가공이 가능한 시스템이다.

현재 국내의 초정밀 경면연마가공기술이 선진 외국에 비해 상대적으로 뒤쳐져 있고, 고부가가치를 갖는 경면제품 및 가공기를 대부분 외국으로부터 수입에 의존하고 있는 시점에서 이와 같은 새로운 공정에 의한 고성능 경면연마기의 개발이 향후 컴퓨터 메모리, 광통신, 무선통신, 초정밀 기계, 전자부품 및 테이프 제조산업 등에서 중요한 가공법으로 응용될 것으로 사료되며, 정밀 연마기 수입대체는 물론 수출효과를 가져올 것으로 전망되고 있다.

복합경면연마는 기존 전해연마공정의 전해이온들의 운동궤적을 적절히 조절함으로써 연마공정의 고능률·고정도를 동시에 달성하기 위해 개발된 공정이다. 일반적인 전해가공은 전해액 및 금속 이온들의 전기화학적 반응에 의해 가공이 이루어지기 때문에 가공에 참여하는 이온들의 개수에 비례하는 금속의 제거가 일어난다. 또한 가공물 표면은 균일하지 않고 요철(凹凸) 형상을 갖고 있기 때문에 가공물표면에 접근하는 이온들의 입사각도가 연마가공특성에 영향을 준다. 자기전해복합연마법은 기존의 전해공정에 자기장을 인가하여 음의 전하를 띄는 전해이온들의 운동경로를 복잡하게 함으로써 금속과 반응하는 실제 이온의 개수를 증가시키고 가공물 표면요철에 대한 이온의 입사각을 변화시켜 능률적인 다듬질 가공이 이루어지도록 한다. 이와 같이 전해이온들의 운동을 복잡하게 하기 위한 자기장의 효과에 대해 분석하면

다음과 같다.

전해가공 중에 이온화된 질량 m (g), 전하 q [C]인 이온이 전기 E (V/m) 및 자계 B (T)가 존재하는 공간에서 속도 v (m/s)로 운동할 때 자기장에 의해 받는 로렌츠힘 벡터 F 는

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

복합경면연마시스템은 음극전극과 양극공작물 사이에 일정한 간극을 주고 전해액을 공급하면서 전압을 인가하면 전해액이 이온화하여 음의 전해이온을 생성시킨다. 이러한 음의 전해이온들이 양극인 금속공작물의 표면에 도달하면 양의 금속이온과 반응하여 표면으로부터 금속이온들을 제거 시킴으로써 가공이 이루어진다. 이 때 전기장과 수직인 방향의 자기장을 인가하면서 전해과정에 따라 경면이 생성된다. 또한 자기장의 강도는 전자석 코일에 흐르는 전해과정에 비례하여 세기가 주어지며, 이 값은 표면의 경면효율과 밀접한 관계를 갖게 한다. 자기장의 강도는 전자석 코일에 흐르는 전류의 세기를 변화시킴으로써 0~0.3T 범위에서 조절할 수 있게 하였다. 전해액은 공작물 표면에 피막이 형성되지 않도록 하기 위해 활성형인 NaCl수용액(20%)을 사용하였고 피삭재는 도전체재료이면 어느 경우나 경면가공이 가능하다. 음극 전극재료는 동(Cu)으로 하고 금속의 제거량 실험에서는 전해액의 유량을 1000ml/min으로 하였다.

복합경면연마시스템은 전극간극전압이 증가함에 따라 전해전류밀도도 증가하며 전극간극이 5mm인 경우는 자기장이 상승할수록 전류밀도도 증가하나 전극간극이 작은 1mm의 경우에는 자기장이 0이거나 0.28T인 경우보다 0.06T인 경우에 가장 큰 전류밀도를 나타낸다. 자기장을 인가할 경우 자기장을 인가하지 않은 경우와 같은 전압에서도 전류밀도가 증가하는 것은 전해이온들이 로렌츠힘을 받아 가속되어 실제 가공을 일으키

는 이온의 수가 증가하기 때문이며, 특정 전극간극에 대해서는 가공능률을 최대로 하는 자기장 세기가 존재함을 알 수 있다.

5. 결론

기계, 정보통신산업의 기반과 반도체산업을 중심으로 특수가공기술의 요구는 급속히 증가할 것으로 예측된다. 특수가공의 개념이 종전의 단순가공법에서 복합가공법으로 발전되어 왔다. 그러나 현재의 기술은 기본적으로 방전액에 실리콘분말을, 연마제에 미세지립을, 복합경면연마에 전해액을 사용하는 등 환경보존문제와 밀접한 관계를 갖고 있다.

특히 최근에는 특수가공에 대하여서도 환경, 자원, 에너지 등에 관한 엄격한 규제가 요구되고 있다. 예로서 가공후 연마제 및 전해액의 재이용 등에 관한 과제 등이 연구과제라 할 수 있다.

(원고 접수일 2001. 3. 21)

참고문헌

- (1) J.D.Kim, M.S.Choi, "Development of the Magneto-Electrolytic-abrasive Polishing System(MEAPS) and Finishing Characteristics of Cr-Coated Roller.", International Journal of Machine Tools and Manufacture-Design Research and Application, Vol.37, No. 7, P. 997~1006, 1997
- (2) J.D.Kim, E.S.Lee, "A Study on the Mirror-like Grinding of MgO Single Crystals with Various Diamond Whirl.", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 72, P. 1~10, 1997
- (3) J.D.Kim, D.X.Jin, M.S.Choi, "Study on the Effect of a Magnetic Field on Electrolytic Finishing Process", International Journal of Machine Tools and Manufacture-Design Research and Application, Vol. 37, No. 4, P. 401~408, 1997
- (4) J.D.Kim, Y.M.Xu, Y.H.Kang, "Study on the characteristics of Magneto-Electric-Abrasive Polishing by using the newly developed nonwoven-abrasive pads", International Journal of Machine Tools and Manufacture-Design Research and Application, Vol. 38, P. 1031~1043, 1998
- (5) J.D.Kim, E.S.Lee, "A Study of the Mirror-Like Grinding of Sintered Carbide with Optimum In-Process Electrolytic Dressing." International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, P. 615~623, 1999, 9