

자기유변유체를 이용한 전기화학/기계적 연마공정의 재료제거특성 Material removal characteristics of electrochemomechanical polishing process using magnetorheological fluid

*장경인¹, 석종원², #민병권¹, 이상조¹,
*K.-I. Jang¹, J. Seok², #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr)¹, S. J. Lee^{1, 2}
¹연세대학교 기계공학부, ²중앙대학교 기계공학부

Key words : Electrochemical anodic reactions, Quartz glass, Glassy carbon, Glass molding press, Micro channel-mixer

1. 서론

바이오, 광학, 정보통신기술의 발달로 초미세 광학 부품의 수요가 증가하고 있으며, 이에 대응하기 위한 3 차원 나노 광학표면 제작기법에 관한 연구 및 방법론 개발이 시급하다. 나노미터 단위의 형상정밀도 및 표면품질을 가진 표면을 제작하기 위해서는 글래스카본과 같은 초고경도·내화학성 재료가 필요하다. 이를 가공하기 위해서 현재까지 이온에너지, 열에너지, 기계에너지, 화학에너지 등을 이용한 여러 방법들이 제안되어 왔지만 재료 자체가 매우 안정하기 때문에 재료 가공 시에는 단점으로 부각된다. 또한 가공이 요구되는 표면이 나노미터 단위의 형상정밀도를 가져야 하기 때문에 제안된 공정은 실제 재료제거를 효율적으로 할 수 있는 에너지보다 매우 적은 에너지만을 사용하여 가공한다. 본 연구에서는 고경도의 표면을 효율적으로 연마하기 위해서 고경도의 표면의 형상을 유지하는 범위에서 수 나노미터의 깊이만을 선택적으로 유화시킴과 동시에 유화된 표면만을 제거하기 위한 기계적 에너지를 부여하는 방법으로 접근하려고 한다. 이를 위하여 다음과 같은 전기화학반응 및 자기기계적 에너지를 복합하여 3 차원 나노표면 제작이 가능한 전기화학/기계적 표면연마 기술을 제안한다.

2. 제안한 공정 원리 및 실험장치

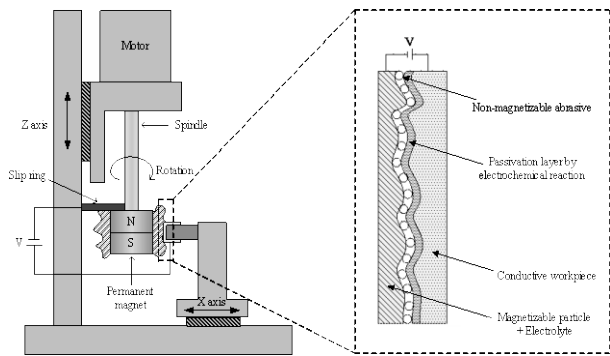


Fig. 1 Experimental set-up to test the proposed ECdMRP process

본 연구에서 제안하는 전기화학/기계적 연마공정은 고경도의 전도성 재료의 표면을 연마하기 위하여 선택적 전기화학적 산화작용² 및 자기장에 의해 발생하는 항복응력³ 사용한다. 그림 1 은 제안한 공정을 구현하기 위한 기초설계장치의 개략도 및 공정 중 피연마재 표면에서 발생하는 재료제거원리를 나타내었다. 이 장치는 회전하는 영구자석 (또는 전자석)과 직선 왕복운동을 하는 시편의 간극에 자기유변유체 및 전해액을 혼합한 유체를 주입하면서 동시에 전기장을 인가하는 장치이다. 이 때 피연마재 표면에서 인가된 전기장에 의해 전기화학적 산화반응이 일어나 표면에 수 nm이하의 산화막이 생성되고, 동시에 자기장에 의해 일정 항복응력이 생성된 유체에 의해 산화막이 제거되게 된다. 산화막 생성-제거-재생성 과정이 반복되면서 고경도 재료의 표면을 효율적으로 제거하는 장점이 있다.

3. 실험 및 결과 분석

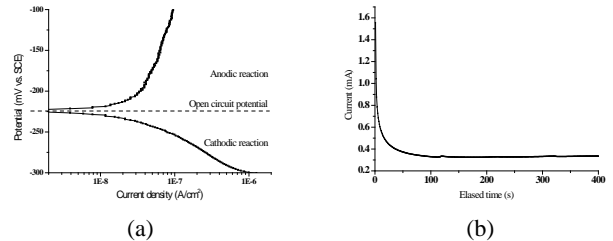


Fig. 2 Electrochemical corrosion experiments of glassy carbon: (a) polarization curve, and (c) time history of the electric current

제안한 전기화학/기계적 연마공정의 실현 가능성 및 특성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 피연마재로 글래스카본(GC-20SS, Tokai), 전원인가 및 측정 장치로는 포텐시오스탯(VersaSTAT3, AMETEK), 기준전극으로는 포화 카로멜 기준전극 (SCE, CHI150, CH instruments), 백금 전극으로는 (MW-4130, BASi), 전해질은 NaOH (pH 13.1)을 사용하였다. 그림 2 (a)의 분극(Tafel)곡선은 스캔속도 1 mV/s 로 측정된 결과이다. 개방회로전위 (Open circuit voltage, OCV)는 약 224.1 mV (vs. SCE)에서 측정되었으며, 해당 전위 이하에서는 환원반응이 해당 전압이상에서는 산화반응이 일어남을 알 수 있었다. 그림 2 (b)의 전류의 시간 곡선은 과전압 1V 를 인가한 상태에서 측정된 결과이다. pH 13.1 의 강알칼리성 수용액상에서 1V 과전압을 인가하였을 경우 전류밀도가 약 1.5 mA 에서 급격하게 감소하다가 약 50s 가 지난 후에는 완만하게 감소하여 약 0.27 mA 로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 전류밀도의 변화로 미루어 보아 글래스카본의 표면에 전기화학적 산화작용에 의한 부동태층이 형성되어 표면저항이 높아졌기 때문으로 판단된다.

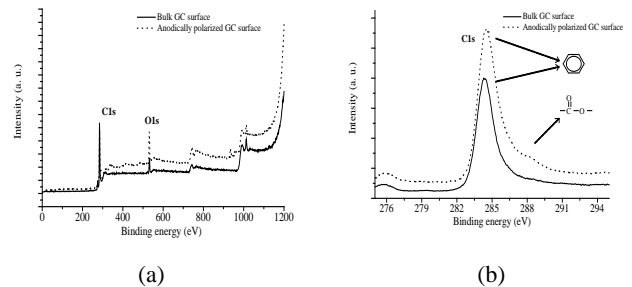


Fig. 3 Electrochemical corrosion experiments of glassy carbon: (a) experimental set-up, (b) polarization curve, and (c) time history of the electric current

그림 3 은 초기 및 양극으로 분극된 글래스카본의 성분 변화를 분석하기 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)를 이용하여 표면을 측정된 결과이다. 그림 3 (가)의 XPS 스펙트라를 보면 반응 전 바인딩 에너지 피크가 284 eV 에서 나타나고 반응 후 바인딩 에너지 피크가 284 eV 뿐만 아니라 289 eV 에서도 나타나는 것을 알 수 있다. 새롭게 나타난 289 eV 는 graphitic C 와 carboxyl groups 를 의미하며 이는 표면에 산화막이 생성되었음을 의미한다.

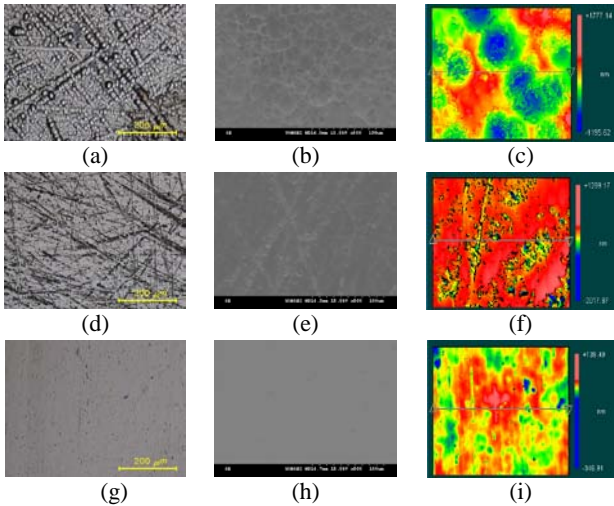


Fig. 4 Surface of GC specimens (a-c) after electrochemical etching, (d-f) after MRP, and (g-i) after the ECdMRP process

다음으로 제안한 공정과 기존의 공정과의 성능을 비교 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 평균 167 nm의 표면조도 값을 갖는 램핑된 글래스카본을 시편으로 준비하였다. 이를 전기화학 에칭, 자기유변연마⁴, 전기화학/기계적 연마 공정을 이용하여 표면 가공을 하였고 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 7 (a-c)는 전기화학적 에칭을 이용하여 표면을 처리한 후의 표면 상태를 나타내고 있다. 램핑 공정 중에 생성된 수많은 마이크로 스크래치에 전기장이 집중되어 국부적으로 전기화학 반응이 집중되어 평탄한 부분보다 에칭이 더 활발하게 일어난 결과 약 256nm로 표면 품위가 떨어졌다. 그림 7 (d-f)는 일반적인 자기유변연마공정을 통하여 시편을 연마한 뒤 표면을 측정할 사진이다. 자기유변 유체에 혼합된 다이아몬드파우더가 표면을 기계적으로 깎고 지나가면서 표면을 연마하는데, 시편의 전체 부분을 효율적으로 연마하지 못하고 부분적으로 돌출된 칩두 부분만을 제거하는 것을 알 수 있다. 그 결과 연마 후 시편의 표면조도가 약 92nm로 표면품위가 소폭 향상되었다. 이는 시편의 재료제거가 기계적인 에너지에 의해서만 진행되는 자기유변연마공정에서 그 크기가 부족하기 때문인 것을 알 수 있다. 그림 7 (g-i)는 제안한 공정을 이용하여 시편을 표면 연마한 후 측정할 사진이다. 초기 시편에 존재하였던 스크래치들이 대부분 제거가 되어 약 11.8 nm의 표면조도로 초기 시편에 비하여 표면품위가 월등히 향상되었다.

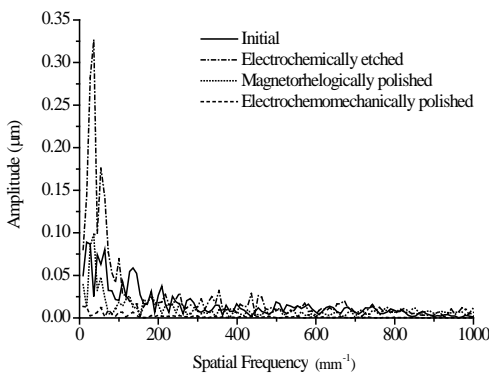


Fig. 5 Amplitude spectrum plot of the surface profiles of GC specimens

아울러 실험 후 글래스카본 표면을 이산 푸리에 변환기법으로 비교 분석하였고 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 초기 상태의 글래스카본의 표면은 공간주파수 200 /mm 이하의 영역대에서 0.025~0.08 μm의 크기를 갖는 것을 알

수 있다. 전기화학적으로 에칭된 시편의 경우 100 /mm 이하의 주파수 영역대에서 0.372 μm으로 크게 증가한 것을 알 수 있다. 전기화학적 산화반응에 의해서 시편의 표면에 크고 작은 흠이 패였기 때문이다. 자기유변연마공정에 의해 연마된 시편의 경우 약 180 /mm 이하의 주파수의 진폭이 소폭 줄어든 것으로 보이지만 크게 달라지지 않았다. 이는 자기유변유체의 기계적인 항복응력만으로는 고경도 재료의 표면을 효과적으로 제거하지 못하였기 때문이다. 제한한 연마공정으로 시편을 연마하였을 경우 공간주파수 전 영역대의 진폭이 현저하게 줄어들었다. 이는 인가된 전기장 및 전해액에 의하여 표면에 산화층을 형성하게 되고, 상대적으로 낮은 경도의 산화막이 자기유변유체의 항복응력만으로도 효율적으로 재료를 제거되었기 때문이다.

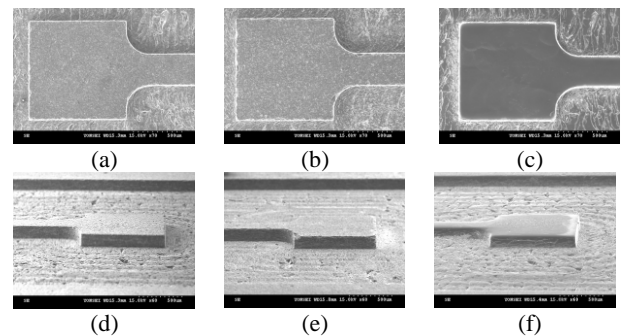


Fig. 6 Surface of GC specimens (a, d) after micro-milling, (b, e) after MRP, and (c, f) after the ECdMRP process

그림 6는 3 차원 형상의 마이크로 채널을 마이크로 밀링공정으로 가공 후 표면을 자기유변연마공정과 제안한 공정으로 표면을 연마한 결과를 정리한 그림이다. 제안한 공정이 기존 공정에 비하여 고경도 재료의 표면을 효과적으로 연마하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

3 차원 형상의 고경도/전도성 표면의 연마가 가능한 전기화학/기계적 연마공정을 제안하였다. 분석 결과 전기화학적 산화작용으로 인하여 표면에 산화막이 형성되고 이 때 생성된 산화막이 자기장에 의해 발생하는 항복응력을 가진 자기유변유체에 쉽게 제거되기 때문인 것을 알 수 있었다.

후기

본 논문은 지식경제부의 전략기술개발사업 “대면적 미세형상 가공시스템 개발”과제의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. Youn, S.W., Takahashi, M., Goto, H., and Maeda, R., “Microstructuring of glassy carbon mold for glass embossing – Comparison of focused ion beam, nano/femtosecond-pulsed laser and mechanical machining,” *Microelectronic Engineering*, **83**, 2482–2942, 2006.
2. Ahmad, Z., “Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control,” Butterworth-Heinemann, 120–270, 2006.
3. Jang, K.-I., Seok, J., Min, B.-K., and Lee, S.J., “Behavioral model for magnetorheological fluid under a magnetic field using Lekner summation method,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **321**, 1167–1176, 2009.
4. Seok, J., Kim, Y.-J., Jang, K.-I., Min, B.-K., and Lee, S.J., “A study on the fabrication of curved surfaces using magnetorheological fluid polishing,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**, 2077–2090, 2007.