

엠보싱 타입 형상의 가공을 위한 Fast Tool Servo의 정밀제어

Precision position control of fast tool servo for diamond turning of embossing type surface

#*김호상, 이광일, 이찬희, 이정훈, 이경돈
 #*H. S. Kim(hoskim@iae.re.kr), K. I. Lee, C. H. Lee, J. Lee, K.D.Lee
 고등기술연구원 로봇/생산기술센터

Key words : Embossing type surface, Fast Tool Servo(FTS), diamond turning machine

1. 서론

광학계의 고집적화와 영상매체의 발전에 의하여 마이크 로미터 이하의 형상오차와 수 나노미터의 조도를 나타내는 초정밀 광학부품의 필요성이 관련산업 전반에 대두되고 있 으며, 이러한 광학부품을 가공하기 위한 방안으로 초정밀 가공기(Diamond Turning Machine: DTM)의 개발이 지속적으 로 이루어지고 있다.^{1,2} 특히, 휴대용 전자기기의 경우 소형 이며 복잡한 형태를 갖는 자유곡면 형태의 렌즈들이 사용 되어 전체기기의 크기와 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다. 소형의 자유곡면 형태의 렌즈들로는 대표적으로 엠보싱 형 태의 면을 갖는 것들이 있으며 이러한 형태의 면을 가공하 기 위해 본 논문에서는 FTS(Fast Tool Servo: FTS)를 이용한 DTM에서의 자유곡면 가공 방식을 소개하고자 한다.

일반적으로 DTM은 2축의 유정압 가이드웨이로 지지 되는 이송 스테이지와 에어스핀들로 구성되며 공구와 가공 소재의 상대적 위치결정을 진행하여 형상을 가공하게 된다. 그러나 Z축 이송 스테이지의 비교적 느린 응답특성에 의 하여 자유곡면 가공시 필요한 빠른 절입(운동)은 주파수에서 한계를 갖게 되며 이에 따라 추가적인 빠른 운동이 가 능한 공구대가 필요하게 된다. 이에 대한 해결방안으로서 공구의 고속 위치결정을 구현하여 자유곡면의 가공을 가능케 하는 고속서보공구대(Fast Tool Servo: FTS)가 유수의 선진 국가에서 연구 및 상용화가 활발히 진행되고 있다.³

본 논문에서는 압전액츄에이터에 의해 구동되는 FTS를 이용하여 자유곡면 형상 중 대표적인 형태인 엠보싱 형상 가공실험을 수행하였다. FTS의 구동원인 압전액츄에이터의 경우 비선형 히스테리시스 특성을 가지므로 왜곡된 출력 변위가 발생하는 문제를 가지고 있으며 이를 해결하기 위 해 AFC(Adaptive Feed-forward Controller)⁴ 방법을 사용하여 히스테리시스를 제거하고 엠보싱 타입 형상의 가공에 적용 하여 적용 가능성을 살펴보았다.

2. FTS를 이용한 엠보싱 형상 가공

2.1 엠보싱 가공 형상

Fig. 1은 FTS를 이용한 엠보싱 형상 가공의 개략도를 보여준다. 특징적인 것은 FTS의 경로생성을 위해 스피ndl의 각도를 실시간으로 받아 사용하고 있는 점이며 이러한 특징은 자유곡면 특히 한 회전당 반복적인 형상이 되풀이되는 엠보싱 형상의 가공에 반드시 필요한 기능이다. 대체적으로 이러한 형상은 Eqn. 1과 같은 정현파 함수들의 곱으로 표시될 수 있으며 대표적인 형태를 Fig. 2에 표시하였다.

$$z = A \cos(2\pi fx) \cos(2\pi fy) \quad (1)$$

여기서 z 는 엠보싱 형상의 높이, A 는 정현파의 진폭, f 는 한회전당 정현파의 형상이 반복되는 주파수, 그리고 x, y 는 각축 방향의 위치좌표값을 나타낸다.

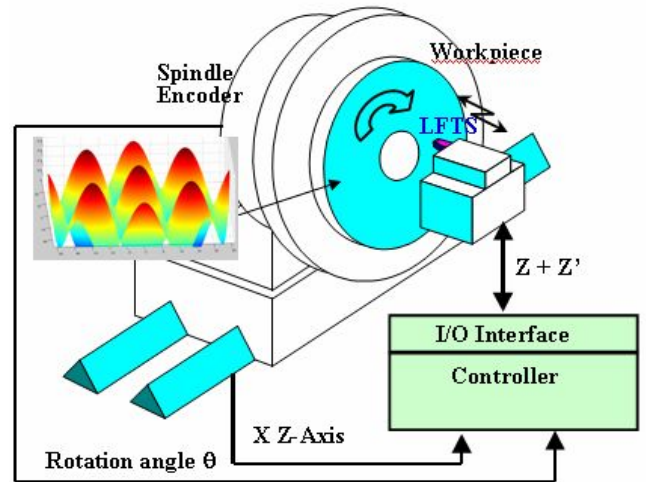


Fig. 1 Block diagram for machining embossing type surface

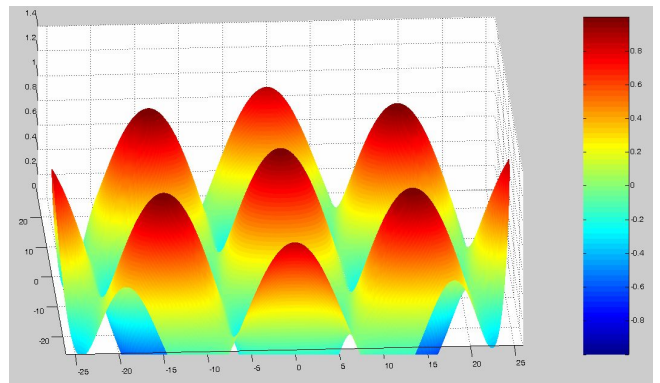


Fig. 2 Embossing type surface

Fig. 2와 같은 형상의 가공을 위해 FTS의 Z축 방향으로 빠르게 절입량을 변화시켜야 하며 회전각도 θ 방향에서 FTS의 요구 궤적은 시간에 따른 일정 주파수를 갖는 정현파와 유사한 형태를 갖게 된다. 일반적으로 FTS는 정현파 입력시 비선형 히스테리시스의 특징을 가지며 정밀위치 제어를 위해 AFC 방법을 적용할 수 있다.

2.2 AFC를 이용한 FTS의 정밀위치제어

AFC를 사용한 비선형 제어 알고리즘의 block-diagram은 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 여기서 AFC의 전달함수는 Eqn. 2에 나타난 바와 같이 2차 전달함수 구조를 가진다.

$$C_{AFC}(s) = g_i \left[\frac{s \cos \phi_i + \omega_i \sin \phi_i}{s^2 + \omega_i^2} \right] \quad (2)$$

여기서 g_i 는 i 번째 AFC의 가중치를 나타내며 ϕ_i 는 위상 처짐, 그리고 ω_i 는 추종 주파수를 나타낸다. FTS의 비선형성에 의하여 발생하는 오차 성분은 여러 주파수의

조합으로 나타낼 수 있으며, 이러한 오차 성분에서 가장 많은 영향을 차지하는 주파수들을 제거하여 전체 추종오차는 최소화할 수 있다는 것이 다수의 AFC 를 사용한 비선형 제어의 기본 방안이다.

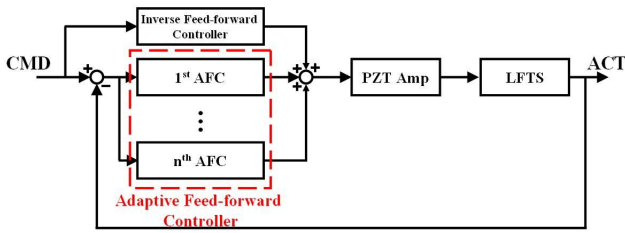


Fig. 3 AFC block diagram for FTS

2.2 엠보싱 타입 형상의 추종결과

Fig. 2의 가공형상으로부터 FTS의 가공경로를 Fig. 4와 같이 생성하였다. 대체로 일정 주파수의 정현파 형태를 가지며 이를 추종하기 위해 6개의 AFC 제어기를 사용하였다. AFC-block의 개수 및 구성 변수는 FTS 제어 시 발생하는 오차의 주파수 특성에 의하여 실험적으로 구할 수 있다.

하드웨어적으로는 FTS의 정밀추종제어를 위해 Turbo-PMAC2 기반의 제어기에 오픈 서보 알고리즘의 형태로서 6개의 AFC를 구현하였다. 엠보싱 형태의 가공경로에 대한 FTS의 추종성능은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4로부터 FTS의 실제 궤적이 요구 궤적에 대체로 추종하고 있으나 직선 형태의 요구 궤적에 대해 고주파의 떨림 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 AFC 제어기의 튜닝을 통해 해결할 수 있으며 추후 이를 보완해 나갈 예정이다.

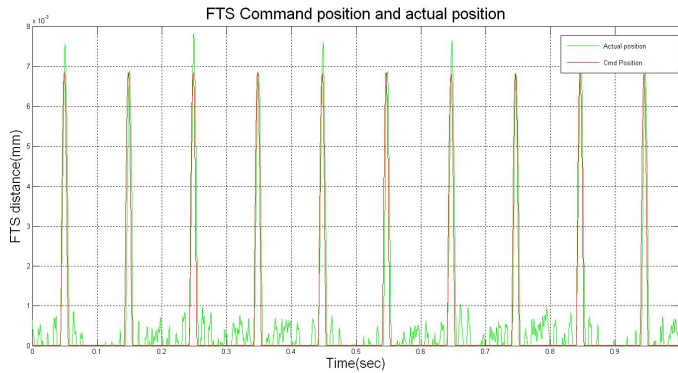


Fig. 4 Tracking result for embossing cutting motion (air-cut)

3. 가공실험

가공실험을 위한 엠보싱 타입 형상은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 가공에 사용된 형상은 평면에 4개의 작은 오목한 구면형태의 형상이 시편 중심에서 일정한 거리를 가지고 존재하는 형태로서 간단한 형태의 엠보싱 형상이다. 이러한 형태의 형상을 가공하기 위해 Fig. 1과 같이 FTS와 초정밀 가공기를 배치하고 제안된 AFC 제어기를 사용하여 가공 실험을 진행하였다. 가공시편은 직경 50mm의 알루미늄이며 가공조건은 이송속도 6.3 mm/rev, FTS의 최대 절입량은 작은 원의 최대 높이 10 μm, 스핀들 회전수 150 rpm이며 공구반경 0.5R의 다이아몬드 공구를 사용하였다. 가공실험 결과 Fig. 6과 같은 4개의 오목한 부분이 가공된 시편을 얻을 수 있었다. 특히, 스핀들 엔코더 값을

사용하여 FTS의 요구궤적을 생성함으로써 스핀들의 회전수가 일정하게 발생되지 않음에도 4개의 원이 정확히 가공됨으로서 스핀들의 회전수를 정확히 인식하고 추종제어가 성공적으로 수행되었음을 알 수 있었다.

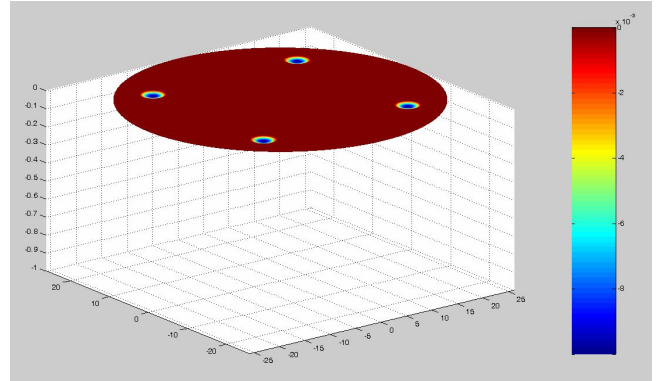


Fig. 5 Three-dimensional model of embossing type surface



Fig. 6 Photograph of machined surface

4. 결론

본 연구에서는 FTS의 정밀제어를 위해 AFC 방법을 적용하고 이를 이용하여 엠보싱 타입 형상의 정밀 가공실험에 적용하였다. 간단한 엠보싱 형태의 형상에 대한 추종실험을 통하여 FTS의 실제궤적이 요구궤적에 근접하게 추종함을 알 수 있었다. 또한, 실제 엠보싱면에 대한 가공실험을 통해 FTS를 이용한 터닝기계에서의 엠보싱 타입 형상의 가공이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. Y. Tohme, R. Murray, "Principles and Application of the Slow Slide Servo," Moore Nanotechnology systems LLC.
2. 양순철, 김건희, 김효식, 이상용, 김명상, 원종호, "항공 우주용 적외선 광학계 초정밀가공기술," 한국정밀공학회지, 24권, 2호, 19-24, 2007.
3. Kim, H. S., Kim, E. J. and Song, B. S., "Diamond Turning of Large Off-axis Aspheric Mirrors using a Fast Tool Servo with on-Machine Measurement," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 3, pp. 349-355, 2004.
4. Byl, M. F., Ludwick, S. J. and Trumper, D. L., "A loop shaping perspective for tuning controllers with adaptive feedforward cancellation," Precision Engineering, Vol.29, No.1, pp. 27-40, 2005.