

자기변형재료를 이용한 마이크로포지쇼닝 시스템의 개발

Development of Micropositioning System Using a Magnetostrictive Material

박영우(충남대 공대), 원문철(충남대 공대)

Young-Woo Park(Chungnam National Univ), Moon-Cheol Won(Chungnam National Univ)

ABSTRACT

In the machining process, variation in cutting forces results in relative displacements between the tool and the workpiece leading to tool vibration. Also there is a demand to change the depth of cut very frequently. A solution for both cases is to develop a system which has the ability to reposition a cutting tool to a very small level, i.e., micron. This paper presents the development of a micropositioning system (MPS) using a magnetostrictive material. The developed MPS is implemented to a lathe and subjected to static and machining tests. The results show that the MPS has good potential for machining application.

Key Words: magnetostriction(자기변형), micropositioning(미소위치결정), experimental design(실험계획법), relative displacement(상대변위).

1. 서 론

가공시 절삭력의 변동은 공구진동을 야기하면서 절삭공구와 가공물 사이의 상대적 변위를 일으켜 절삭가공의 질에 영향을 미친다. 따라서, 공구와 가공물 사이의 상대적 변위를 일정한 수준으로 유지하는 것이 필요하다. 또한, 경우에 따라서 절삭깊이를 매우 빈번하게 바꾸면서 비원통형 가공물을 가공해야 될 필요가 있다. 이러한 문제들은 공구를 마이크로 단위로 제어할 수 있는 능력을 갖춘 마이크로포지쇼닝 시스템을 개발함으로써 가능하다.

마이크로포지쇼닝에 사용가능한 기술은 다양하다. 대표적으로, 압전 액츄에이터, 유압 액츄에이터, 기억형상합금 액츄에이터, 전자기 액츄에이터, 정전기 액츄에이터 등을 들 수 있다^{1,4}. 그 중 압전 액츄에이터가 가장 많이 사용되고 있으나 변위와 출력이 상대적으로 작은 단점이 있다.

자기변형 효과는 1842년 제임스 주울에 의해 니켈에서 처음으로 발견되었다. 그 후 코발트, 철, 그리고 이러한 재료들의 합금들로 자기변형효과를 보이는 것으로 밝혀졌으나 최대자기변형치가 50ppm 정도로서, 유사한 기능을 가진 압전재료의 변형치보다 상당히 작았기 때문에 그리 큰 관심을 끌지는 못하였다. 그러나 철과 희토류 금속의 합금에 기초한 자기변형재료의 개발은 새로운 응용분야의 발전을 급격히 야기했다. 현존하는 자기변형재료로서 가장 유망한 것은 미국의 Etrema사에서 생산, 판매하고 있는

Tenfenol-D이며 약 2000ppm 정도의 최대 자기변형치를 낼 수 있다⁵. Terfenol-D는 희토류 금속인 테르븀(Terbium)의 Ter, 철(iron)의 원소기호인 Fe, 개발된 장소인 NOL(Navy Ordnance Lab), 그리고 또다른 희토류 금속인 디스프로슘(Dysprosium)의 D로 구성된 합성어이다.

자기변형재료를 이용한 분야는 국내에서는 아직 연구가 활성화되지 않은 상태이지만, 외국의 경우 이러한 재료를 이용한 연구가 매우 활발하다. Calkins 등은 Terfenol-D 액츄에이터를 이용하여 수직밀링머신의 떨림을 줄이고자하는 연구를 했지만, 실제적으로는 지지들이 설계한 회전축을 이용하여 밀링가공을 시뮬레이션했다⁶. Eda 등은 자체에 개발한 자기변형재료를 이용한 액츄에이터를 개발하여 초정밀 가공에 성공적으로 적용하였다⁷. Mechler 등은 자기변형재료를 이용한 액츄에이터가 절삭가공용 마이크로포지쇼너를 개발해서 그 가능성을 제시했지만 제한된 범위의 가공에 적용하는데 그쳤다⁸.

본 연구의 목적은 자기변형재료를 이용한 선삭용 마이크로포지쇼닝 시스템을 개발하고 개발된 시스템을 실제가공에 적용하여 정적 및 가공 특성 시험을 행함에 있다.

2. 자기변형

자기변형 현상은 자기변형재료가 자장속에서 축방향으로 길이가 늘어나고 줄어서 선형적으로 움직이는

현상이다. 외부 전원장치에 의해 구동되는 코일이 자기변형재료를 감싸고 필요한 자기장을 공급한다. 이러한 현상은 Fig. 1에 나타난다. 만약 Terfenol-D 로드상에 가해진 기계적 응력이 없다면, 선형적 변형은 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$S = Hd \quad (1)$$

단, d 는 Terfenol-D의 자기변형상수로서 20×10^{-9} m/A의 값을 가진다.

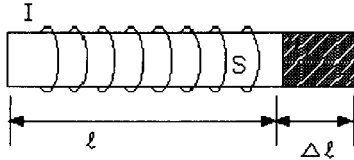


Fig. 1 Magnetostriction Phenomeon

자장밀도(H)는 다음과 같이 표현된다.

$$H = n \times I = \frac{N}{l} \times I \quad (2)$$

단, N =코일의 감은 횟수, l =로드의 길이, I =전류. 또한 로드와 늘어남 길이가 Δl 인 경우, 스트레인은 다음과 같이 정의 된다.

$$S = \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

Terfenol-D 로드와 높은 에너지 밀도는 높은 힘을 제공한다. 이러한 관계는 다음식으로 표현된다.

$$F = \frac{E \cdot A \cdot \Delta l}{l} \quad (4)$$

단, E =Terfenol-D의 탄성계수, A =로드의 단면적.

3. 마이크로포지셔닝 시스템의 개발

마이크로포지셔닝 시스템은 프레임, 자기변형액츄에이터와 액츄에이터의 마운트, 코일, 위치센서, 힘센서, preload 나사 등의 요소로 구성되어진다. 마이크로포지셔닝 시스템의 기능상의 요구사항은 다음과 같다: 약 0.1mm의 선형 운동 범위를 가질 것; 백래시가 없을 것; 응답성이 빠를 것; 약 300 N의 최대

힘을 낼 수 있을 것.

프레임은 두께 약 8 cm의 알루미늄 블록을 사용하여 밀링머신으로 가공되어졌다. 액츄에이터로는 직경 10 mm, 길이 45 mm의 Terfenol-D 로드와 사용된다. 액츄에이터 마운트는 직경 50 mm, 길이 60 mm의 원통형 엔지니어링 플라스틱을 가공하여 만들었다. 0.4 mm 굵기의 에니멜선을 액츄에이터 마운트에 1200회 감았다. 개발된 마이크로포지셔닝 시스템의 시험중 Terfenol-D로드가 칩핑되는 현상이 야기되었다. 이것은 로드와 낮은 인장강도와 연성의 부족에서 기인한다. 해결책으로 steel cap을 가공하여 한쪽면에는 로드, 다른 한 쪽 면에는 preload용 나사를 끼우고, 사이에는 종이 테잎을 오려 붙여서 걸리는 하중의 분산을 꾀했다. Fig. 2는 완성된 마이크로포지셔닝 시스템이다.

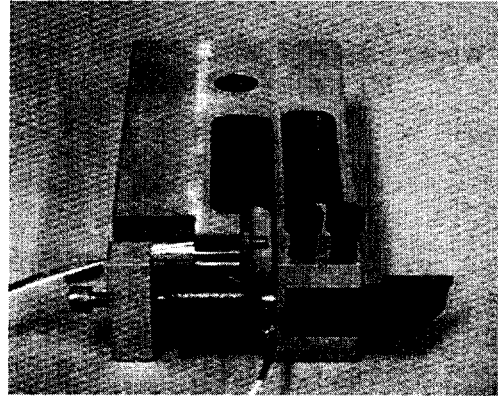


Fig. 2 Developed Micropositioning System

4. 실험장치 및 방법

4.1 실험장치

본 연구에서 개발된 마이크로포지셔닝 시스템의 정적 및 가공 시험을 위해 사용한 실험장치는 Fig. 3과 같다. 실험장치는 실험용 선반, 마이크로포지셔닝 시스템, 직렬 전원 공급기, 데이터 취득 시스템으로 구성되어있다.

4.2 마이크로 포지셔너 시스템의 정적 특성실험

정적 특성 실험에서는 코일에 전류를 흘리지 않은 상태에서 마이크로포지셔닝 시스템의 프레임만의 강성 그리고 프레임과 액츄에이터가 결합된 상태에서의 강성을 알아내는 실험을 수행하였다. 다음에는 코일에 전류를 흘리면서 힘과 변위의 관계를 알아보

4. 실험결과 및 고찰

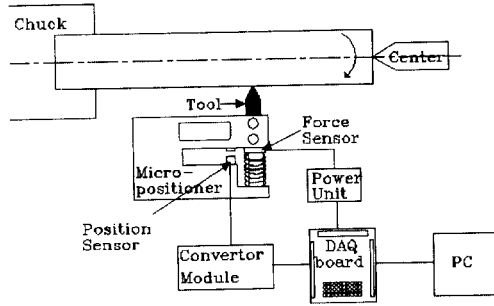


Fig. 3 Schematic Diagram of Experimental Setup

왔는데, 전류는 직류 전원 공급기에서 손으로 조작되어 공급되었다. 이 실험은 Terfenol-D 로드에서 약 200 N 정도의 preload를 가한 후 실험하였다.

4.3 절삭 실험

효과적인 실험을 위해 2^k 요소배치법(factorial design)의 변형인 중앙합성배치법(central composite design)이라는 실험계획법이 사용되어진다. Table 1은 선반가공 실험 조건을 나타낸다.

Table 1 Experimental Conditions

수준	절삭속도 m/min	절삭깊이 mm	이송량 mm/rev
높음	200	2.0	0.42
중앙	100	1.0	0.21
낮음	50	0.5	0.105

가공재료로는 직경 75 mm, 길이 500 mm 알루미늄 2024 환봉을, 공구로는 초경 (DNMG 150608)을 각각 사용하였다. 가공실험은 크게 마이크로포지셔닝 시스템에 전류를 흘린 상태(ON)와 안 흘린 상태(OFF)로 나누어서 행해진다. 절삭실험을 실시할 때 마다 가공물의 편심을 제거하기 위하여 절삭깊이 0.2 mm로 다듬질 가공을 실시하였다. 공구 마멸에 따른 실험값의 오차를 줄이기 위하여 매 절삭실험마다 공구를 교환하였다. 절삭력과 변위의 측정에는 각각 PCB사의 압전로드셀과 Electro사의 근접센서로 검출한 신호를 각각 Power Unit와 Converter Module을 통한 후 NI사의 A/D Converter Card를 거쳐 그래프로 나타내어진다.

정적 특성실험 결과로부터 프레임만의 강성은 1.02×10^6 N/m로 계산되며, 프레임과 Terfenol-D 로드의 결합체의 강성은 1.05×10^7 N/m로 계산된다. 코일에 전류를 흘리면서 힘과 변위의 관계를 알아보는 실험 결과(Fig. 4)에서 전류가 일정한 구간에서 힘의 감소가 보이는 것은 힘센서 시스템의 전하 방출(discharge)현상에 기인한다. 따라서 전류가 3 A에서 다시 0 A로 떨어졌을 경우 잔류하는 힘은 약 18 N정도이며, 이것은 약 12 %의 히스테리시스를 의미한다. 실험으로부터 최대의 전류가 3 A 흐를 때 Terfenol-D가 약 150 N 정도의 힘을 발생시키는데, Terfenol-D가 낼 수 있는 최대 힘(300~400 N)을 발생시키기 위해서는 Terfenol-D의 비선형성을 고려해야 함을 알 수 있으며, 정밀한 제어를 위해서는 히스테리시스 효과도 고려해야 함을 알 수 있다.

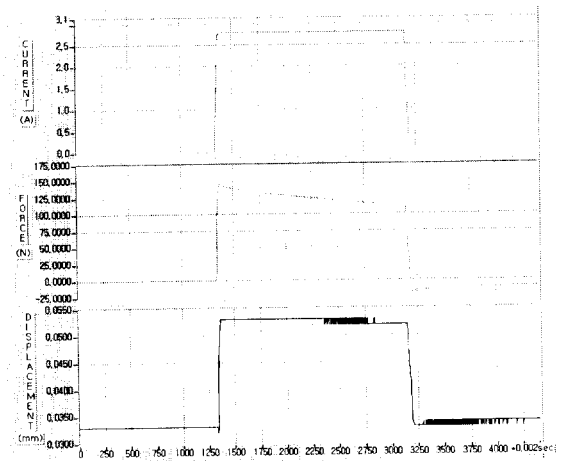


Fig. 4 Generated Force and Gap with Abrupt Change of Current

Fig. 5는 절삭속도 100 m/min., 절삭 깊이 1 mm, 이송량 0.21 mm/rev의 절삭조건으로 절삭했을 때 시간의 경과에 대한 전압(상), 절삭력(중) 그리고 gap(하)을 측정하여 그 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 5에서 다음과 같은 상황이 관찰된다:

첫째, OFF상태의 가공이 시작되자마자 절삭력이 (-)레벨로 떨어지고 gap이 증가한다. 이것은 주 절삭력에 의한 모멘트의 영향으로 굴근부분에 미소한 뒤틀림이 생기면서 그 영향으로 gap은 증가하고 힘은 감소한다고 생각된다.

둘째, ON상태가 되자 절삭력과 gap이 급격히 증가하고, 시간의 경과에 따라 절삭력이 줄어드는 경

향이 있다. 이것은 ON상태가 되면 Terfenol-D 로드 에 자기장이 형성되어 Terfenol-D 로드가 길이 방향으로 늘어나면서 힘과 변위의 증가를 가져오기 때문이다. 또한, 시간에 따라 절삭력이 줄어드는 경향은 실제 절삭력의 감소라기 보다는 센서자체의 전하가 서서히 방출된다고 생각할 수 있다. 그래서 가공이 끝난 부분의 절삭력을 보면 상승되는 현상을 볼 수 있다.

같은 절삭조건에서 절삭력과 gap에 대한 OFF, ON상태의 표준편차를 비교해보면, ON상태에서의 평균 표준편차(절삭력 = 9.45 N, gap = 1.15 μm)가 OFF상태에서의 평균 표준편차(절삭력 = 10.06 N, gap = 1.33 μm)보다 적음을 알 수 있다. 즉, 마이크로포지닝 시스템을 사용함으로써 가공물과 공구의 상대적 변위를 줄일 수 있음을 의미한다.

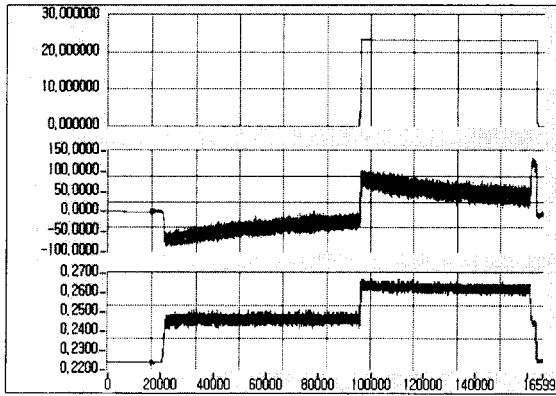


Fig. 5 Time vs. Voltage, Cutting Force, and Gap

6. 결론 및 향후 연구방향

자기변형재료를 이용한 선삭용 마이크로포지닝 시스템을 설계, 제작하여 정적 및 가공 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 개발된 마이크로포지닝 시스템은 입력전류가 약 0~0.7 A까지의 경우 선형시스템으로 간주할 수 있으며, 3 A까지 전류를 흘린 경우 약 12 % 정도의 히스테리시스 특성도 보이는 비선형 시스템이다.

둘째, 개발된 마이크로포지닝 시스템을 절삭가공에 적용한 결과, 공구와 가공물사이의 상대변위를 줄일 수 있었다.

향후 연구방향은 주절삭력에 의한 굴근 부분의 뒤틀림을 해결할 수 있는 시스템의 보완, 실용화를 위

한 closed-loop 제어시스템의 설계 및 적용 등이다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비 (기계공학:ME96-E-31)에 의하여 연구되었으며, 이에 교육부 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Wells, D.L., Iversen, E.K., Davis, C.C., and Jacobsen, S.C., "An Investigation of Hydraulic Actuator Performance Trade-offs Using Generic Model," Proceedings of the 1990 IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 2167-2173, 1990.
2. Ikuta, K., "Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator," Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2156-2161, 1990.
3. Hollis, R., "Design for a Planar XY Robotics Fine Positioning Device," Proceedings of the Symposium on Robotics and Manufacturing Automation, ASME WAM, pp. 291-298, 1985.
4. Mahadevan, R., "Capacitance Calculation for a Single-Stator, Single-Rotor Electrostatic Motor", 1987 IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop, pp. 93-100, 1987.
5. Butler, J.E., Application Manual for the Design of ETREMA Terfenol-D Magnetostrictive Transducers, Edge Technologies, Inc., Ames, IA, 1988.
6. Calkins, F.T., Zrostlik, R.L., Flatau, A.B., and Vogel, J.M., "Terfenol-D Vibration Control of a Rotating Shaft", ASME WAM, 1994.
7. Eda, h., Ohmura, E., Sahashi, T., and Kobayashi, T., "Ultraprecise Machine Equipped with a Giant Magnetostriction Actuator-Development of New Materials, $Tb_xDy_{1-x}(Fe_yMn_{1-y})_n$ and Their Application", Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 421-424, 1992.
8. Michler, J.R., Moon, K.S., Sutherland, J.W., and Kashani, A.R., "Development of a Magnetostriction Based Cutting Tool Micropositioner", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXI, pp. 421-427, 1993.