한국정밀공학회지 제 29 권 11 호 pp. 1214-1220 November 2012 / 1214
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 29, No. 11, pp. 1214-1220 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2012.29.11.1214

진동절삭기 구성을 위한 자기변형 재료의 진동 특성 규명

Vibrational Characteristics of Magnetostrictive Materials for a Vibration Assisted Cutting Device

이호철 [1], 김기대 [1,✉]
Ho Cheol Lee[1] and Gi Dae Kim[1,✉]

1 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu)
✉ Corresponding author: gidkim@cu.ac.kr, Tel: 053-850-2724

Manuscript received: 2012.3.16 / Revised: 2012.7.16 / Accepted: 2012.8.7

Vibration assisted cutting (VAC) is one of the promising methods for precision machining, which has been normally equipped with piezoelectric materials. In this paper, a feasibility of applying magnetostrictive materials to VAC as a cutting device instead of piezoelectric materials was studied. For this, the vibrational characteristics of a magnetostrictive material was investigated with respect to a coil design, a preload, and the effects of a biasing and an exciting magnetic fields. The output strain of a magnetostrictive material is restricted due to an increasing inductive impedance as the exciting frequency increases and the heat of coil, etc. Through the experimental results, it was found that the biasing and the exciting magnetic field affected the output performance significantly but not the preload. In conclusion, the magnetostrictive material could be used only in the low frequency range but not a good candidate for high frequency actuating application.

Key Words: Magnetostriction (자기변형), Vibration Assisted Cutting (진동절삭), Coil Design (코일설계), Bias Magnetic Field (바이어스 자기장), Exciting Magnetic Field (가진 자기장)

1. 서론

제품의 초정밀화, 고집적화 추세로 인해 부품의 초소형화 및 초정밀화를 실현시키기 위하여 최근 다양한 초정밀 가공방식이 시도되고 있으며 그 중 하나가 진동절삭(*VAC*, vibration assisted cutting) 방식의 가공법이다. 이는 기존의 절삭공정에 고주파의 미세한 진동을 추가함으로써 절삭저항을 줄이고 가공형상의 정밀도를 높일 수 있는 방법으로 알려져 있다.[1-4]

2 차원 진동절삭이라고 할 수 있는 타원궤적 진동절삭(*EVC*, elliptical vibration cutting)이란 Fig. 1 에서 볼 수 있는 것과 같이 절삭공구에 절삭 방향과 배분력 방향으로 2 차원 진동을 일으키면서 절삭 공정을 수행하는 것을 말한다. 선행연구들을 통해 절삭 공구의 끝에 마이크로미터 단위의 2 차원 타원궤적 진동을 생성시키면서 미세 절삭가공하면 절삭저항이 감소하고, 공구 수명이 증가하고, 표면조도가 향상되는 등의 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.[5-8]

일반적으로 대표적인 능동형 물질(active material)이란 압전소자(piezoelectric material), 자기변형 재료(magnetostrictive material), 그리고 형상 기억합금을 말하는데, 공구에 미세한 진동을 발생시키는 방법으로 기존의 연구 [1-8] 에서는 거의 모두 압전소자를 이용하였으며, 선행연구 [7,8] 결과에 의하면 타원궤적

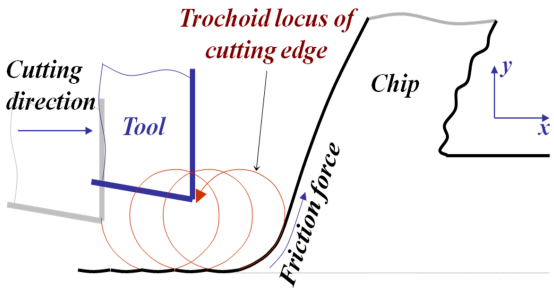

Fig. 1 Trajectory of cutting tool in elliptical vibration cutting

진동절삭의 효과는 구동기의 변위가 클수록 초정밀 가공효과가 높다고 알려져 있다.

Park 등 [9] 이 밝힌 바와 같이 자기변형 재료는 주로 공구의 미세이동, 공구의 능동 진동제어 및 능동형 공구 고정 장치 등의 저주파 영역에서 주로 사용되고, 압전소자는 주로 진동절삭과 같은 고주파 영역에서 주로 사용되는 것이 유리하다. 하지만 압전소자를 진동절삭에 적용하는 것에 관해서는 지금까지 매우 많은 이론 및 실험적 연구가 이루어지고 있음에 비해서 큰 변위를 발생시킬 수 있는 자기변형 재료를 이용한 진동절삭에 관한 연구는 전무하다. Thoe 등 [10] 이 압전소자와 자기변형 재료를 진동절삭이 아닌 초음파 가공(ultrasonic machining)에 적용하여 이를 비교한 바 있기는 하나 언급한 물질이 주로 압전소자에 한정되었다.

이에 본 연구에서는 자기변형 재료를 이용한 구동기(actuator)를 진동절삭에 적용하는 것이 타당한지에 대한 정량적 및 정성적인 판단을 하고자 한다. 자기변형 재료를 이용한 구동기를 직접 제작한 뒤 코일과 관련된 각종 설계변수들의 영향을 살펴보고 다양한 실험을 통해서 자기변형 재료에 가해지는 예하중의 크기, 바이어스 자기장, 가진 자기장 등의 크기 등이 절삭구동기의 출력 변위 특성에 미치는 영향을 살펴보았으며, 이러한 이론적 추론 및 실험 결과를 통해서 자기변형 재료를 *EVC* 에 적용할 때의 한계를 명확하게 하고자 한다.

2. 자기변형 소자 구동기의 특성

2.1 코일의 임피던스

압전소자 또는 자기변형 재료를 사용하는 방식의 구동기는 모두 시간에 따라서 변화하는 교번전압을 사용하기 때문에 주파수 변화에 따른 임피던스 문제는 매우 중요한 고려사항이 된다. 이는 특히 자기변형 구동기의 구동용 코일에서 발생하는 열(heat) 문제와 밀접한 연관을 가지고 있다.

일반적으로 Fig. 2 와 같은 솔레노이드 코일에 대해서 임피던스는 Eq. (1) 과 같이 표현된다.

$$Z(f) = R + \frac{1}{j(2\pi fC)} + j(2\pi fL) \qquad (1)$$

위의 식에서 R 은 코일의 동선저항 값, f 는 구동 주파수, C 는 코일에 기생(parasitic)하는 용량성분, L 은 코일의 유도성분을 각각 나타낸다. 진동절삭에 이 방식을 적용하면 사용하는 주파수가 주로 수십 *kHz* 정도로 높고 본래 코일이 가진 용량성분이 크지 않기 때문에 용량성분의 영향을 무시할 수 있다. 하지만 유도성분에 의한 임피던스는 주파수에 비례한다.

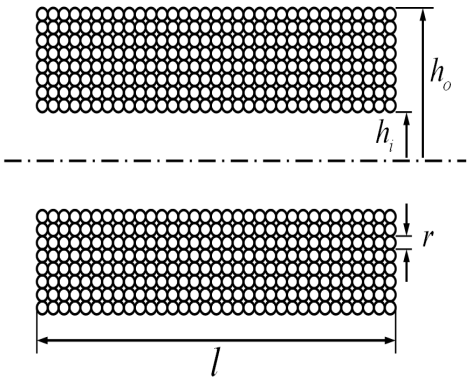

Fig. 2 Solenoid coil and its dimensions

2.2 최대 변형률(변위)의 한계

압전소자와 달리 자기변형 소자는 입력 전압과 출력 변위 사이의 관계를 보다 선형적으로 만들고 출력 변위를 증가시키기 위하여 일반적으로 바이어스 자기장을 걸어준다.[11] 이때 자기변형 재료에 발생하는 변형률(λ)은 외부에서 걸어주는 자기장의 세기(magnetic intensity: H)에 비례하며 이 자기장의 세기는 이 연구에서 제시하고 있는 자기회로의 경우 코일의 감은 수(N), 코일에 인가되는 전류(I) 그리고 평균 자로 길이(l)의 함수가 된다.

$$\lambda(f) \propto H(f) = \frac{I(f)N}{l} \qquad (2)$$

솔레노이드 형태의 코일로 가진되는 자기변형 재료에 큰 변위를 생성시키기 위해서는 Eq. (2)에 의해 감은 수 N 과 투입되는 전류의 크기 $|I(f)|$ 는 크게 하고 평균 자로 길이 l 을 짧게 하는 것이 좋다. 하지만 3 가지 모두 현실적으로 쉽지 않은데 그 이유는 다음과 같다.

2.2.1 전류 증가로 인한 코일 열 발생

전류의 양을 증가시키면 코일에 주울(Joule)열 발생이 증가한다. 코일 재료인 구리는 전기저항이 매우 작지만 발생하는 열이 공급된 전류의 제곱에 비례하므로 단순히 Eq. (2)에 의거하여 변위를 키우기 위해서 전류를 크게 하면 코일에서 과도한 열이 발생할 수 있다. 이 열은 그 자체로써도 코일의 동선을 감싸고 있는 에나멜 코팅이나 코일의 보빈(bobbin)을 녹일 수 있다. Fig. 3 은 자기변형 재료의 진동특성을 규명하기 위하여 본 연구에서 제작한 기구를 보여주고 있다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 제한된 공간 내에 코일, 요크 및 자기변형 소자를 조립해야 하기 때문에 코일과 자기변형 소자가 매우 근접한 위치에 있을 수밖에 없다. 자기장과 관련된 대부분의 특성들이 그러하듯이 자기변형 특성도 온도가 상승함에 따라서 성능이 나빠지게 되므로 이 부분에서도 문제가 발생할 수 있다.

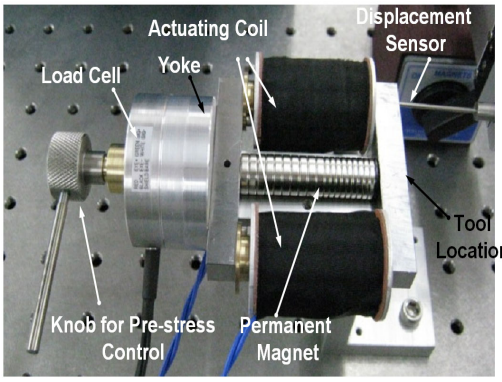

Fig. 3 Photo of a manufactured magneto-strictive actuator

2.2.2 N 수 증가로 인한 L 증가

Eq. (2)를 단순하게 적용하면 코일의 감은 수 (N)를 증가시키면 이에 비례하여 변형량(λ)이 커지게 된다. 하지만 이는 정적 혹은 준정적(quasi-static) 구동의 경우에는 적용이 가능하지만 고주파 대역의 진동절삭의 경우에는 적용할 수 없다. 2.1 에서 언급한 바와 같이 주파수(f)가 높은 영역에서 코일의 임피던스는 주로 유도성분 L 에 의해서 영향을 받게 된다.

Fig. 2 에 나타난 형상의 코일의 경우 L 을 형상관련 설계 변수들로 구체적으로 표현하면 다음과 같다.[12]

$$L = \frac{\mu_0 \pi a N^2}{l} K_L \tag{3}$$

여기서 $a = (h_i + h_o)/2$ 로 코일의 평균 반지름을 나타내며 K_L 은 l 과 a 의 함수로 $1 < l/2a < 10$ 인 코일 형상에 대해서 1 근방의 값을 가진다. Eq. (3)을 통해서 N 의 제곱에 비례해서 유도용량이 증가한다. 이는 같은 전압입력에 대해서 발생하는 출력 변위가 N 의 제곱에 반비례해서 작아진다는 것을 의미하므로 변위를 가능한 키워야 하는 진동절삭 응용에서는 매우 불리한 측면이다.

Eq. (1)에서 정전용량에 의한 임피던스 기생성분을 무시하고 Eq. (3)을 적용하면 Eq. (4)를 얻을 수 있다.

$$Z(f) = R + j\frac{2\mu_0 \pi^2 f a N^2}{l} K_L \tag{4}$$

Eq. (4)에 교류에 관한 오옴의 법칙 $V(f) = Z(f)I(f)$ 과 Eq. (2)를 대입하면 Eq. (5)와 같이 기계구조적인 영향을 고려하지 않은 가진 전압 V 와 λ 사이의 전달함수를 구할 수 있고 이 식을 통해서 코일의 감은 수 N 의 증가가 오히려 변위 λ 를 감소시킴을 알 수 있다. 그리고 앞서 예상과 달리 실제 최종 전달함수는 발생하는 변위가 N 의 제곱에 반비례하지 않고 N 에 반비례함을 알 수 있다.

$$\lambda(f) = \frac{N}{Rl + j2\mu_0 \pi^2 f a N^2} V(f) \tag{5}$$

2.2.3 자로길이(l) 축소의 한계

평균 자로길이(l)는 구동기의 크기와 직접적으로 관련되어 있다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 l 을 작게 하면 상대적으로 코일을 수납할 수 있는 공간이 작아질 수 밖에 없고 이는 코일의 감은 수를 늘이는데 한계가 있다는 것을 의미한다. 물론 코

일의 감은 수는 앞서 언급한 유도용량의 문제도 함께 고려해야 한다.

2.3 전압기준 성능평가

Fig. 4 는 참고문헌 13 에서 인용한 것으로 Y 축의 단위가 전류로 표현되어 있음을 알 수 있다. 이 논문에서는 이를 근거로 고주파 영역에서 오히려 자기변형 재료가 유리하다는 결론을 내리고 있다. 하지만 이렇게 높은 주파수에서 코일에 전류를 흘리기 위해서 필요한 전압은 매우 높을 수밖에 없으며 이는 안전성 및 전력전자 소자의 실용성 측면에서 매우 불리하게 된다. 따라서 자기변형 재료와 같은 유도용량이 주된 임피던스를 구성하는 구동소자의 경우 반드시 전압을 기준으로 성능을 평가해야 해야 한다.

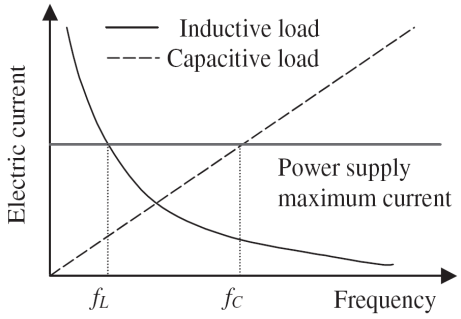

Fig. 4 Power supply frequency restrictions[13]

3. 실험장치의 구성

3.1 진동절삭을 위한 자기변형 구동기

타원형태의 궤적을 만들어내기 위해서는 최소한 2 개의 구동기가 필요한데 이를 구현하는 방법 [12] 에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 평행하게 배치된 2 개의 구동용 자기변형 소자를 이용하였다. 자기변형 소자는 직경 10 mm 에 길이 50 mm 인 것을 사용하였으며 그림에서는 가진용 코일(actuating coil) 내부에 조립되어 있어 보이지는 않는다. 2 개의 가진용 코일에 서로 다른 위상(phase)을 가지는 정현파 전압을 입력하면 2 개의 평행한 자기변형 소자는 위상차를 가진 변위가 생성되고 이 두 변위가 2 차원적으로 합성되어 그림에서 'Tool Location'이라고 표시된 부분에서 2 차원 타원궤적이 생성된다.

Fig. 3 에서 2 개의 가진용 코일 사이에 'Permanent Magnet'으로 표시된 영구자석은 전체 자기회로에 바이어스 자기장인 DC 성분의 자기력을 공급하는 역할을 담당한다. 실린더 디스크 형태의 서로 다른 두께를 가진 희토류계 자석을 여러 개 겹쳐서 사용함으로써 영구자석의 높이를 조절하였다. 노브(knob)를 이용하여 자기변형 재료에 걸어주는 응력의 크기를 조절하였고 로드셀(load cell)로 이를 측정하였으며, 응력의 크기에 따른 자기변형 재료의 진동 특성이 어떻게 달라지는 지 관찰하였다.

3.2 전체 실험장치의 구성

Fig. 5 는 Fig. 3 에 보인 자기변형 구동기의 진동 특성을 측정하기 위한 전체 실험장치를 개략적으로 설명하고 있다. 전체 실험은 PC 에 연결된 NI(National Instrument)사의 다기능 DAQ 보드 및 GPIB 보드를 이용해서 제어하고 있다. 함수발생기로부터 나오는 신호를 동력증폭기로 증폭하여 코일에 입력함으로써 가진 주파수와 크기가 다양한 가진 자기장을 걸어주었다. 바이어스 자기장을 보다 정밀하게 제어하기 위하여 중앙에 영구자석을 이용하는 대신 Fig. 5 에 보인 바와 같이 한쪽 코일에 가진용 정현파 전압을 걸어주고 다른 한쪽 코일에는 바이어스 자기장 생성용 DC 전압을 걸어주는 방식을 택하였다. Vishay 사의 프리앰프(P3)를 사용하여 로드셀로부터 나오는 신호를 증폭 및 필터링하여 예하중(pre-stress)의 양을 측정하였으며, Nanotek 사의 광화이버 변위 측정기(optical fiber displacement sensor)를 사용하여 자기변형 재료에서 발생하는 미소 변위를 측정하였다.

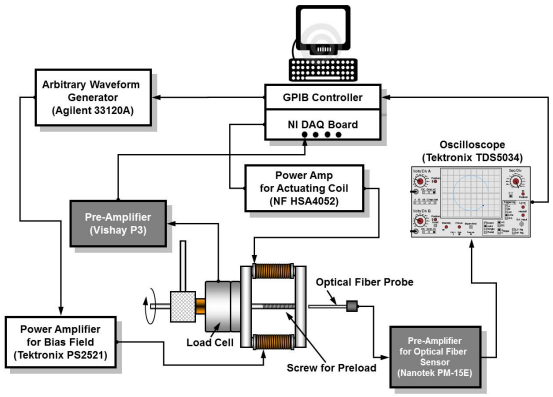

Fig. 5 Experimental setup for evaluating the properties of proposed magnetostrictive actuator

4. 실험 및 결과

4.1 바이어스 자기장의 영향

바이어스 자기장이 진동절삭기 구성을 위한 자기변형 소자 구동기에 미치는 영향을 평가하였으며 그 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6 에서 X 축은 가진용 코일에 가해지는 정현파 전압의 주파수를 나타내고 Y 축은 광화이버 변위센서로 측정한 가진기 공구 장착부의 변위를 나타낸다.

그 결과를 살펴보면 코일에 가해지는 가진 주파수가 높아짐에 따라 임피던스가 증가하여 전체적으로 출력특성, 즉 발생 변위가 급격하게 감소하였다. 정현파 가진 전압의 크기를 증가시키면 출력 변위의 크기는 어느 정도까지는 같이 증가하지만 그에 따라서 코일에 흘려주어야 하는 전류의 양도 함께 증가하므로 앞서 언급하였듯이 열 문제가 발생하게 된다. 또한 주파수를 500 Hz 까지만 증가시켰음에도 불구하고 출력 변위가 거의 1 μm 수준으로 감소하였다. 일반적으로 압전소자를 이용한 가진기를 이용하는 경우 수십 *kHz* 대역의 주파수를 사용하는 것을 고려할 때, 이 실험 결과에 의하면 자기변형 소자를 고주파 대역에서 사용하는 것은 불리하다는 것을 알 수 있다.

한편 실험 결과를 살펴보면 출력 변위는 바이어스 자기장의 크기에도 영향을 많이 받음을 알 수 있고 비교적 큰 변위를 발생시키는 저주파 영역에서 그 현상이 더욱 두드러짐을 확인할 수 있다. 또한 6 V 가 될 때까지는 바이어스 전압이 점차 증가함에 따라 출력 변위가 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있지만 그 이상 바이어스 전압을 증가하여도 자기적인 현상에서 일반적으로 나타나는 포화현상이 발생하여 출력 변위의 변화가 거의 없음도 확인할 수 있다.

한편 90 Hz, 140 Hz, 200 Hz 등 특정한 주파수에서 매우 큰 출력 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이의 원인을 구체적으로 규명하기 위하여 모달(modal) 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 해석 결과 90 Hz 와 200 Hz 근처에서 공진이 나타났고 따라서 이는 기계적 공진에 의한 것임을 확인하였다. 60 Hz 에서 공진과 비슷한 현상이 나타났는데 이는 60 Hz 전원노이즈에 해당한다. Fig. 6 에서 나타난 140 Hz 피크값은 모달해석 결과로 확인할 수 없었는데, 이는 본 연구에서 사용한 액츄에이터가 매우 높은 L 값을 가지고 있기 때문에 낮은 주파수에서 전기적 공진이 나타난 것이 아닌가 추정할 수 있으며 이에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

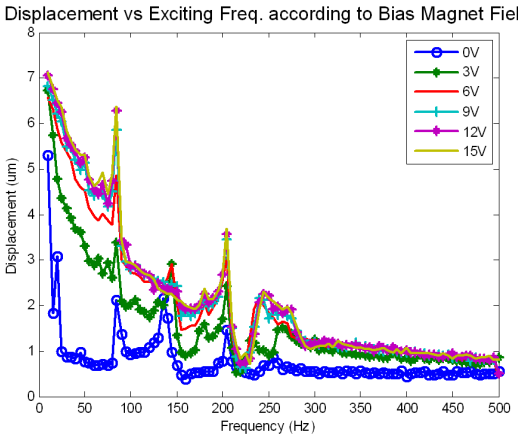

Fig. 6 Displacement versus actuating frequency according to bias field variations (input voltage for exciting = 10 V, fixed)

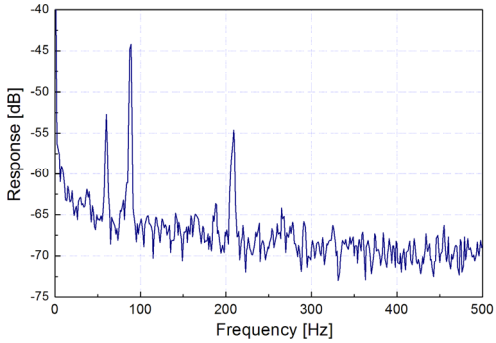

Fig. 7 Result of modal analysis of vibration assisted cutting device

4.2 가진용 자기장의 영향

가진용 전압이 출력에 미치는 영향을 파악하기 위해서 이번에는 바이어스 자기장을 15 V 로 일정하게 유지한 상태에서 가진용 전압의 첨두값(peak-to-peak)을 변화시켜가면서 출력변위를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 실험 결과 예상할 수 있듯이 가진용 전압의 크기는 바이어스 전압과 마찬가지로 출력에 매우 큰 영향을 끼침을 확인하였고, 바이어스 자기장의 경우와 마찬가지로 상대적으로 저주파 영역에서 확연한 차이를 보였다. 바이어스 자기장의 경우에 비해서 완화되기는 했으나 가진 전압이 증가할수록 점차 가진 전압의

영향이 감소하는 포화현상도 역시 확인할 수 있었다. 그러나 상대적으로 주파수가 높은 영역에서는 가진 전압이 증가함에 따른 출력변위의 포화현상이 크게 감소하여 가진 전압의 크기 변화에 거의 비례하여 출력 변위가 변화하는 것으로 나타났다.

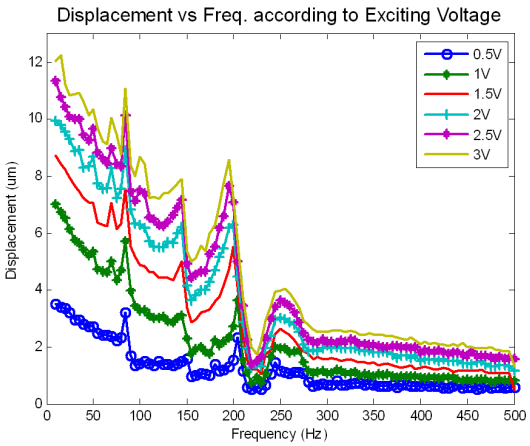

Fig. 8 Displacement versus actuating frequency according to exciting voltage variations (bias DC voltage = 15 V, fixed)

4.3 예하중의 영향

자기변형 소자를 가진기로 사용하는 경우 압전 소자를 사용할 경우와 마찬가지로 압축력에는 강하나 인장력에는 매우 취약한 비대칭적인 특성을 보이기 때문에 일정한 수준의 예하중을 가해주어야 한다. 이러한 예하중의 크기가 변화함에 따라 출력 변위 특성이 어떻게 변화하는지 관찰하였다.

Fig. 3 에 보인 바와 같이 예하중을 가해주는 장치의 중간에 로드셀을 삽입하여 예하중의 크기를 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 3 에는 중앙에 배치된 바이어스 자기장용 영구자석으로 가려져 보이지 않지만 Fig. 5 에서 볼 수 있는 바와 같이 장치의 중앙에 놓인 축의 한쪽 끝부분과 반대편 요크를 볼트-너트 구조로 만들어 이 축을 회전하면 회전량에 비례하는 예하중이 축의 위, 아래에 대칭으로 위치한 자기변형 소자에 1/2 씩 가해지도록 하였다. 이러한 장치를 이용하여 예하중의 크기에 따른 출력(변위)의 변화를 실험적으로 확인하고 Fig. 9 에 그 결과를 나타내었다. 실험 결과 예하중의 크기가 출력 성능에 미치는 영향은 바이어스 자기장의 크기나 가진용 전압의 크기가 미치는 영향에 비해서 상대적으로 매우 작은 것으로 나타났다. Fig. 9 의 결과에서 예하중의 크기와 출력 변위와의 관계를 보다 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 10 에 특정한 몇 개의 주파수에 대해서 이들의 관계를 나타내었다. 출력변위는 예하중 크기에 따라 민감하게 변화하지는 않았지만 예하중의 크기가 증가할수록 출력 변위는 전체적으로 약간 감소하다가 다시 증가하는 복잡한 현상을 보였다. 이러한 예하중의 변화에 따른 출력변위와의 관계를 보다 명쾌하게 설명하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

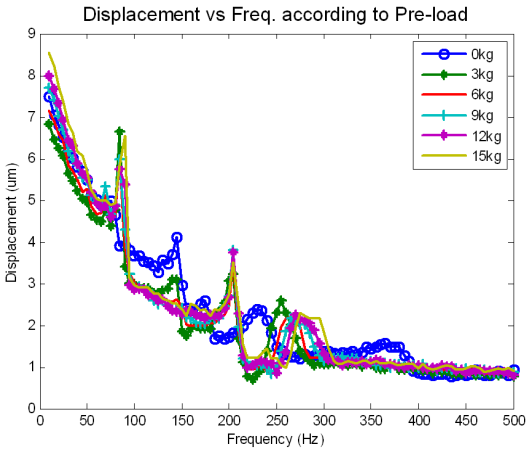

Fig. 9 Displacement versus actuating frequency according to preload variations

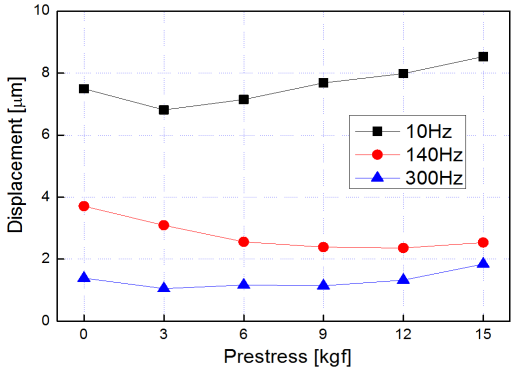

Fig. 10 Preload versus Displacement for different exciting frequencies

5. 결론

본 연구에서는 고주파의 진동절삭기의 가진 구동기로서 자기변형 소자를 적용할 수 있는지를 검

토하였다. 자기변형 소자를 이용한 구동기의 설계, 특히 코일 설계의 관점에서 예상되는 여러 가지 문제점을 정성적으로 고찰하였고, 바이어스 자기장 및 가진 자기장의 세기, 그리고 예하중의 크기가 출력변위에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가진주파수가 증가함에 따라 코일의 유도형 임피던스가 증가하여 출력 변위를 제한하고, 과도한 열 발생, 제작 공간의 제약 등으로 인해 출력 변위를 증가시키는데 코일 설계 시 많은 제약이 존재함을 확인하였다.

(2) 바이어스 자기장과 가진 자기장이 증가할수록 출력 변위가 증가하였으나 일정한 크기 이상에서는 출력에 포화현상이 나타났으며 가진 자기장 보다 바이어스 자기장이 변화할 때 상대적으로 포화현상을 더 확실히 관찰할 수 있었다.

(3) 예하중의 크기 변화는 바이어스 자기장과 가진 자기장의 변화에 비하여 출력 변위에 미치는 영향이 작았으며, 가진주파수 대역에 따라서 예하중의 영향은 매우 복잡하게 변화하는 것으로 나타났다.

(4) 결론적으로 자기변형 재료는 가진주파수가 상대적으로 낮은 영역에서는 압전소자에 비해 발생하는 변위와 힘의 크기가 큰 장점을 살릴 수 있지만, 가진주파수가 수십 *kHz* 대역인 진동절삭과 같은 응용에서는 유리하지 않음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012 년도 대구가톨릭대학교 교내 연구비 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Brehl, D. E. and Dow, T. A., “Review of vibration-assisted machining,” Precision Engineering, Vol. 32, pp. 153-172, 2008.
2. Wang, J., Shao, Y., and Zhu, X., “Kinematics Analysis and Experimental Study on Ultrasonic Vibration Honing,” International Technology and Innovation Conference, pp. 1-4, 2009.
3. Alma, K., Mitrofanov, A. V., and Silberschmidt, V. V., “Experimental Investigation of Forces and Torque in Conventional and Ultrasonically - Assisted Drilling of Cortical Bone,” Medical Engineering and Physics, Vol. 33, No. 2, pp. 234-239, 2010.
4. Wang, W. Q., Miller, M. H., Huang, Y., and Chandra, A., “Using Vibration-Assisted Grinding to Reduce Subsurface Damage,” Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 329-337, 2000.
5. Shamoto, E. and Moriwaki, T., “Study on Elliptical Vibration Cutting,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 43, No. 1, pp. 35-38, 1994.
6. Suzuki, N., Yokoi, H., and Shamoto, E., “Micro/nano Sculpturing of Hardened Steel by Controlling Vibration Amplitude in Elliptical Vibration Cutting,” Precision Engineering, Vol. 35, pp. 44-50, 2011.
7. Kim, G. D. and Loh, B. G., “Characteristics of Elliptical Vibration Cutting in Micro V-grooving with Variations of Elliptical Cutting Locus and Excitation Frequency,” Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 18, No. 2, Paper No. 025002, 2008.
8. Kim, G. D. and Loh, B. G., “Elliptical Vibration Cutting with Variable Trajectory for Ultra-precision Micro-Machining,” J. of the KSPE, Vol. 24, No. 11, pp. 52-58, 2007.
9. Park, G., Bement, M. T., Hartman, D. A., Smith, R. E., and Farrar, C. R., “The Use of Active Materials for Machining Process: A Review,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, No. 15, pp. 2189-2206, 2007.
10. Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., and Wise, M. L. H., “Review on Ultrasonic Machining,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, No. 4, pp. 239-255, 1998.
11. Lee, H. C. and Kim, H. Y., “Effect of Biasing Magnetic Fields on the Patch-Type Magnetostrictive Transducers,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 1177-1183, 2009.
12. Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa, M., and Nakamura, N., “Ultrasonic Motor,” Clarendon Press, p. 28, 1993.
13. Pomirleanu, R. and Giurgiutiu, V., “High-field Characterization of Piezoelectric and Magnetostrictive Actuators,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15, No. 3, pp. 161-179, 2004.