

전자기 구동장치를 이용한 재료시험기 개발

이세한[#]
(#경남대학교)

Development of a Material Test Machine Using an Electro-Magnetic Actuator

Se-Han Lee[#]

(Received 17 September 2013; received in revised form 18 December 2013; accepted 6 January 2014)

ABSTRACT

In this research, a material test machine is developed which uses a small electro-magnetic actuator and a leverage mechanism. The leverage mechanism amplifies the force from the electro-magnetic actuator. The electro-magnetic part operates more silently and cleanly than a hydraulic part. In a tooth material study, a test machine does not require a large force capacity because it handles only 4 mm²-sectioned and short-span specimens. Conventional test machines such as those by Instron and the BOSE Enduratec ELF3200 have too high a force capacity for a tooth material study. A test machine for a tooth material study requires an acting force only on the order of tens of Newtons (N) operating at several Hertz.

Key Words : Electro-Magnetic Actuator(전자기 구동장치), Force Sensor(힘 센서), Leverage Mechanism(지렛대 기구), DSP Controller(DSP 제어기), Tooth Material(치아재료)

1. 서 론

재료시험기는 전형적으로 금속재료를 대상으로 하는 경우 수 백만 N 정도의 시험하중을 발생시키는데, INSTRON^[1]의 일부 시험기 모델의 경우 최대 5백만 N 정도의 시험하중을 발생시키고 있다. 반면에 금속이 아닌 치아재료를 시험대상으로 하고 4 mm² 정도의 단면적을 갖는 시편을 4점 지지로 시험할 때, 해당 재료시험기는 수 Hz의 약 수십 N

정도 하중을 발생시킬 필요가 있다^[2].

치아재료 연구용으로 주로 사용되는 기존의 BOSE Enduratec ELF3200^[3]와 같은 시험기는 약 250 N까지 발생시킬 수 있다. 이 시험기는 치아재료를 충분히 시험할 수 있지만 그 발생력이 필요량보다 지나치게 커서 낭비라고 할 수 있다. 뿐만 아니라 기존 시험기는 고가이므로 장시간이 소요되는 시험을 다양한 조건에서 수행하기 위해서 많은 시험기가 동시에 필요하게 되는 시험환경에 부합되기 곤란하다.

본 연구에서는 치아재료 시험에 핵심적인 기능인 수십 N 정도^[2]의 하중을 수 Hz 주기로 발생시킬 수 있는 시험기 기구와 해당 제어기를 개발하

[#] Corresponding Author :
Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University.
E-mail : leesehan@kyungnam.ac.kr

였다. 본 연구에서는 치아재료 연구용으로 적합한 소규모 하중을 발생시키기 위해서 청결하고 정숙한 운전환경을 제공하는 전자기 구동장치를 채택하였다.

본 연구의 내용으로 소규모 전자기 구동장치로 충분한 하중을 발생시키기 위해서 제안한 지렛대 원리를 이용한 하중발생 기구와 변위측정 장치를 제시하였으며, 하중발생 장치의 핵심인 전자기 구동장치와 제어를 이용한 실험결과를 제시하고 그 유효성을 제시하였다.

2. 하중발생 기구

2.1 구동력 증폭장치

본 연구에서 제안되어 시험 제작된 하중발생 기구에서는 지렛대 원리를 이용하여 전자기 구동장치에서 생성된 구동력이 증폭된다. 구동력 증폭장치를 다음 Fig. 1에 나타내었다.

아래 그림에 표시된 지렛대에서 특이한 점은 작용점(B)과 받침점(C)가 모두 직선운동을 한다는 점이다. 시험제작된 하중발생 기구는 수직방향의 직선운동을 목적으로 하므로 작용점(B)는 직선관절(prismatic joint)에 부착되어 있으며, 그 조건을 만족하려면 받침점(C)는 수평방향으로 움직여야 하는데, 받침점(C)에서 허용된 자유도는 수평방향이므로 그 받침점(C)는 수평방향의 직선관절 위에 부착되어 있다.

한 편, 수직으로 움직이는 전자기 구동장치는 힘점(A)에 부착되는데, 힘 점(A)가 움직이는 변위와 작용점(B)가 움직이는 변위는 엄밀하게 선형관계를

갖지 않고 다음과 같은 비선형 관계를 갖는다.

$$I_B = b \sin\left(\frac{I_{arc}}{a+b}\right) \quad (1)$$

이 때, I_B 는 작용점(B)의 수직변위, I_{arc} 는 전자기 구동장치점 (A)의 원호변위, a 와 b 는 각각 힘 점 (A)와 작용점(B)와 받침점(C) 사이의 거리를 나타낸다. 본 연구에서 구성된 값 $a = 53.5$ mm, $b = 15.0$ mm 이 적용되었을 때, 해당 힘 증폭비는 다음과 같다.

$$\frac{F_r}{F_a} = \frac{15.0+53.5}{15.0} \cong 4.57 \quad (2)$$

본 연구에서 하중발생 기구의 이동범위는 약 ± 2.5 mm 정도가 되므로 최대 2.5 mm 에 대하여 지렛대는 약 9.6° 회전하며 그에 따른 원호변위는 $I_{arc} = 11.44$ mm 가 된다. 이 때, 힘 점(A)의 직선거리는 $(a+b) \times \sin(9.6^\circ) = 11.42$ (mm)가 되어 최대 약 0.16% 오차가 발생한다.

2.2 변위 측정장치 LVDT

본 연구에서 하중발생 기구의 동작변위를 측정하기 위해서 다음의 Fig. 2에 표시된 최대 ± 6.25 mm 측정범위를 갖는 measurement specialties사의 LVDT (MHR 250)와 신호증폭기가 이용되었다.

앞에서 전자기 구동장치의 구동력을 증폭하기 위해서 지렛대 구조가 사용되면서 전자기 구동장치에 의한 변위와 작용점(B) 변위 사이에 최대 0.16% 만큼의 오차가 발생하였다. 실제로 0.16% 오차는 실용적인 측면에서 받아들여질 수 있을 뿐만 아니라 변위 측정장치에 해당하는 LVDT 의 코어가 작용점(B)에 직접 부착되므로 0.16%의 오차

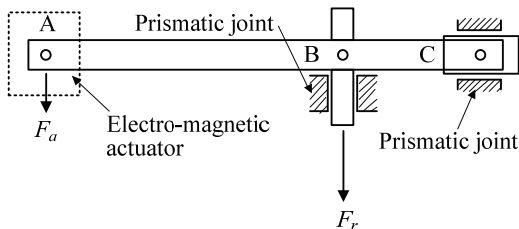


Fig. 1 A leverage mechanism for the force amplifying

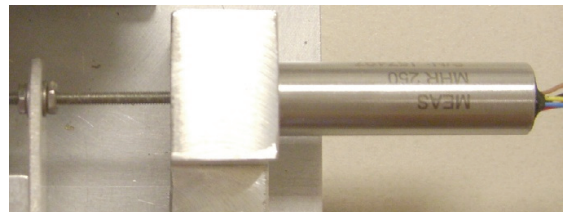


Fig. 2 An LVDT with ± 6.25 mm range

는 동작결과에 심각한 문제를 유발하지 않을 것으로 예상된다.

3. 전자기 구동장치

본 연구에서 사용된 전자기 구동장치는 영구자석과 구동권선으로 구성되어 있는데, 영구자석과 구동권선 사이에서 발생하는 구동력은 영구자석의 자속세기 (B)와 구동권선에 흐르는 전류 (I)의 크기에 비례하게 된다. 이 때, 자속세기 (B), 전류 (I), 그리고 발생력 (F) 사이의 관계식은 다음의 Lorentz 법칙을 따르고 있다.

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \quad (3)$$

3.1 전자기 구동장치 구현

본 연구에서 구성된 전자기 구동장치는 다음의 Fig. 3과 같이 영구자석이 생성한 자속 사이에서 구동권선이 직선으로 움직이는 가동 권선형으로 구성되었으며, 그 기초설계는 공개용 소프트웨어인 FEMM4.2^[4]를 이용하여 수행되었다.

FEMM4.2의 시뮬레이션 결과를 기반으로 구성된 전자기 구동장치는 200회 감은 구동권선을 이용했을 때, 10.1 N/A의 힘 발생력 계수를 갖는 것으로 측정되었다. 이 때, 구동권선에 흐르는 전류의 방향에 따라서 발생력의 방향이 전환되므로 발생력 방향을 전환하기 위해서는 간단히 구동권선에 흐르는 전류의 방향을 전환할 필요가 있다. 구동권선에 흐르는 전류의 방향전환은 다음에 설명하는 전류 드라이브 회로가 담당하게 된다. 실제 구성된 전자기 구동장치의 외형을 Fig. 4에 나타내었다.

3.2 전자기 구동장치 주변회로

전자기 구동장치는 그 발생력 원동력을 구동권선에 흐르는 전류로부터 생성시키므로 전류를 공급하는 전류 드라이브 회로를 필요로 한다. 이 때, 전자기 구동장치의 최종발생 목표는 작용힘 (acting force) 이므로 구동장치 말단에 부착된 힘 센서의 검출값 (force value)이 A/D 변환기를 통해서 외부 (제어기)로 출력될 필요가 있다. 전자기 구

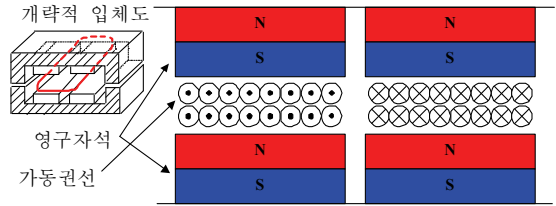


Fig. 3 A candidate structure of an electro-magnetic actuator

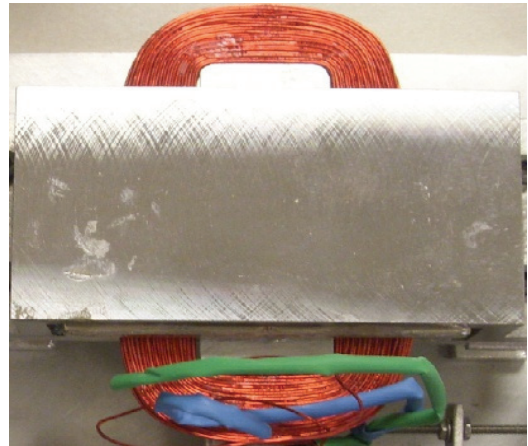


Fig. 4 Constructed electro-magnetic actuator

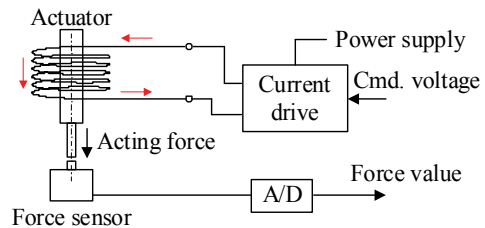


Fig. 5 Schematic diagram of electro-magnetic actuator control system

동장치의 구동 및 검출 회로를 Fig. 5에 나타내었다.

3.3 전자기 구동장치 제어기

전자기 구동장치의 발생력을 정확하게 조절하기 위해서는 구동장치에 부착된 힘 센서의 출력값을 기반으로 전자기 구동장치에 흐르는 전류가 조절

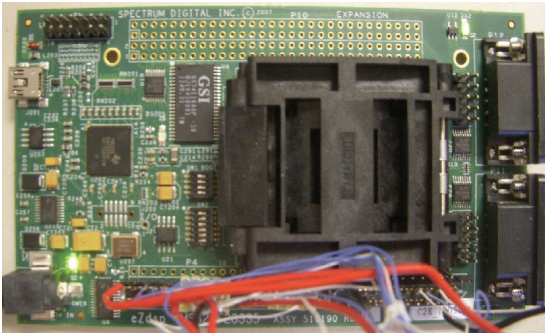


Fig. 6 TI F28335 DSP controller

되어야 한다. 다음의 Fig. 6은 발생력 조절에 사용된 TI의 F28335 DSP^[5] 제어기를 나타내고 있다. 이 DSP 제어기는 발생력 제어뿐만 아니라 사용자의 조작입력까지 처리하게 된다.

4. 발생력 제어결과 및 고찰

재료시험기는 주어진 재료에 특정한 크기의 하중을 작용하기 위해서 구동력 발생장치, 힘 센서, 그리고 제어기로 구성된다. 시험기에 사용된 전자기 구동장치에서 발생된 힘의 크기는 지렛대 기구를 경유하면서 마찰과 같은 외적인 요인에 의해서 감소되므로 구동장치 말단에 부착된 힘 센서로 검출되어 그 결과가 제어기로 입력되고 주어진 힘이 적절히 발생되도록 제어기는 전자기 구동장치에 특정한 전류를 출력하게 된다. 구성된 시험기 외형을 Fig. 7에 나타내었다.

4.1 구동력 발생 실험결과

전자기 구동장치의 발생력을 조절하기 구동권선에 전류를 흘릴 수 있는 전류구동 드라이브 회로가 사용되었다. 이 전류구동 드라이브 회로는 전압 형태의 신호를 입력으로 받아서 구동권선에 전류를 흘리는 역할을 한다. 다음 Fig. 8은 전류구동 드라이브 회로에 단순히 선형으로 증가되는 전압입력을 작용했을 때, 힘 센서에서 검출된 힘의 실험 결과를 나타내고 있다.

Fig. 8의 결과에 의하면 전류구동 드라이브 입력

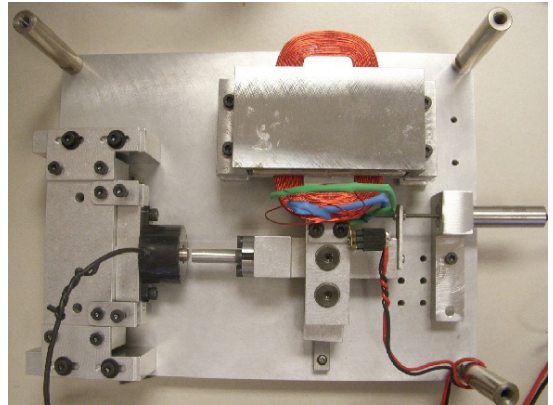


Fig. 7 A plane view of the tester

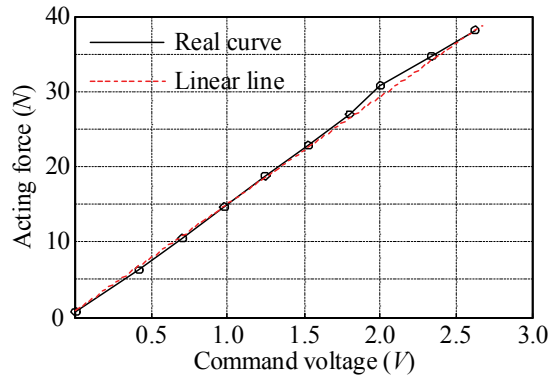


Fig. 8 Actuating force vs. command voltage to the current drive

전압 (command voltage)과 발생력 (acting force) 사이에 근사적인 선형관계만 성립하는 것을 알 수 있다. 이 근사적인 선형관계로 말미암아 정밀한 힘 제어가 곤란한 문제가 발생할 수 있다. 이 문제는 구동장치 말단에 부착된 힘 센서에서 검출된 값을 제어기에 피드백하여 개선될 수 있다. 피드백 제어기로 산업계에서 주로 사용되는 신뢰성 높은 PID (Proportional Integral Derivative) 제어기법^[6]이 적용되었다.

4.2 구동력 발생 피드백 제어기

본 연구에서 개발된 시험기는 주어진 재료에 단순히 하중을 작용하는 기능뿐만 아니라 수 Hz 범

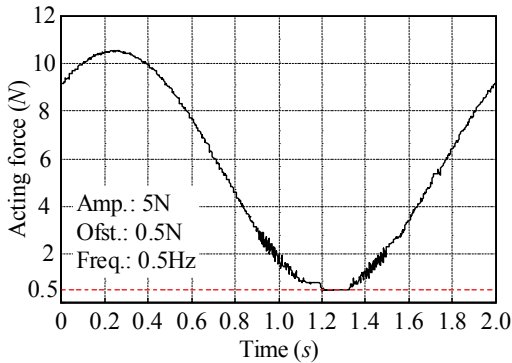


Fig. 9 Actuating force response for the reference of 5 N amplitude, 0.5 N offset, and 0.5 Hz frequency

위에서 발생하중을 가변시킬 수 있는 기능을 보유하고 있다. 다음의 Fig 9는 단차 (offset) 0.5 N에 대하여 진폭 5 N의 하중을 0.5 Hz로 작용한 실험결과를 제시하였다.

Fig. 9에 제시된 실험결과는 단차 0.5 N, 진폭 5 N의 정현파 목표를 양호하게 추종하고 있음을 나타내고 있다. 동일한 단차와 진폭에서 주파수를 각각 2 Hz와 5 Hz로 증가시킨 정현파 목표에 대한 실험결과가 Fig. 10에 제시되었다.

Fig. 10의 실험결과는 진폭이 2 Hz 및 5 Hz인 목표에 대하여 양호하게 추종하고 있음을 나타내는 반면에 단차목표인 0.5 N에 대해서는 2 Hz 목표에 대한 단차 추종결과는 약간 벗어남을 보이고 있다. 특히, 5 Hz 목표에 대한 단차 추종결과는 좀 더 벗어남을 보이고 있다. 단차성분은 시험대상의 지지를 위해서 시험대상을 일정한 힘으로 누르는 역할을 하므로 시험기 성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

목표 파형의 주파수가 증가함에 따라서 단차 추종결과가 열화되는 원인으로 전자기 구동장치에 부착된 지렛대의 질량 때문에 가동부 관성이 증가하여 기구의 동특성이 반영되었기 때문으로 추정된다. 이 문제를 개선하기 위해서 지렛대 기구부분의 최적화를 통해서 지렛대가 차지하는 질량을 개선할 필요가 있다.

5. 결론

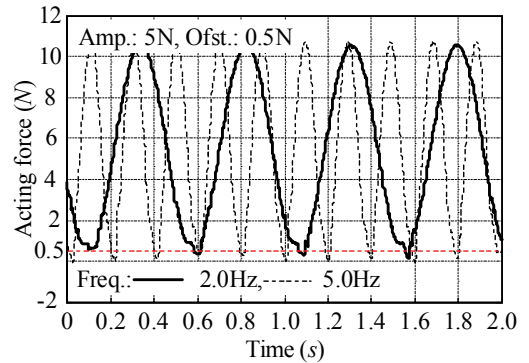


Fig. 10 Actuating force responses for the references of 2 Hz and 5 Hz frequency. The rest conditions are the same as Fig. 9

본 연구에서는 치아재료 연구용 시험기에 사용될 수 있는 힘 발생장치와 힘 제어를 구현하였다. 힘 발생장치로 가동 권선형 전자기 구동장치를 전용소프트웨어 FEMM4.2를 이용하여 기본 설계를 하고 실제 전자기 구동장치를 구성하였다. 시험기에 필요한 하중을 전적으로 전자기 구동장치에 의존하지 않고 지렛대 구조의 하중 증폭장치를 이용하여 구동장치의 용량을 감소시킴으로 전체적인 소비전력을 감소시켰다. 구성된 시험기에 치아재료 시험에서 주로 사용되는 5 N 진폭, 5 Hz 사례를 적용해서 양호한 제어 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

“본 연구는 2012학년도 경남대학교 연구년 연구비 지원에 의한 것임.”

REFERENCES

1. <http://www.instron.us/wa/product/default.aspx>
2. Mobin Yahyazadelhfar, Mustafa Murat Mutluay, Hessam Maid, Heonjune Ryou, Dwayne Arola, "Fatigue of the resin-enamel bonded interface and the mechanism of failure," Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials Vol. 21, pp. 121-132, 2013.
3. http://worldwide.bose.com/electroforce/en_us/web/32

0_products/pase.html

4. <http://www.femm.info/wiki/Homepage>
5. <http://www.spectrumdigital.com>
6. Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems 5ed., Pearson Prentice Hall, 2006.