

전자석을 이용한 외팔보 능동 진동 제어에 관한 연구

고강웅*, 최수영*, 강기원**, 이종성***, 박기현*
 *성균관 대학교, ** (주)미다스코리아, ***부천대학

A Study on Cantilever Beam Active Vibration Control using Electromagnetic Force

Kangwoong Ko*, Sooyoung Choi*, Kiwon Kang**, Jongsung Lee***, Kiheon Park*
 *SungKyunKwan University, **Midas Korea Co. LTD., ***Bucheon College

Abstract - 진동을 감소시키는 방법으로 과거에는 최적의 설계 변수를 선정하는 수동 제어 방법이 주로 연구되었으나, 보다 확실한 진동 제어를 위하여 최근에는 피드백 루프(Feedback loop)를 이용하는 능동제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 능동제어에 의한 진동을 억제하는 방법에 대하여 연구하려고 한다. 진동체로는 외팔보를 선택하였으며 진동체의 진동을 제어하는 장치로는 제어코일과 베이스코일로 구성된 Push-Pull 타입의 전자석 제어회로를 직접 제작하고 시스템을 모델링 하고자 한다.

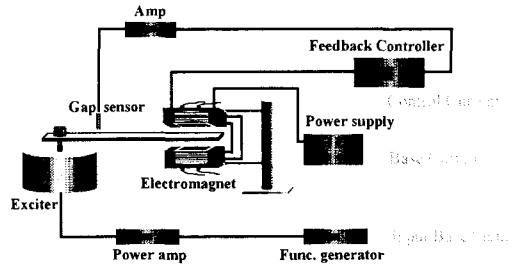


그림 1. 전자석을 이용한 능동 진동 제어 시스템

1. 서 론

기계계에서 진동은 기계의 특성상 항상 발생하는 현상이나, 산업 공해 측면에서 진동을 줄여야 하며, 고속, 고정밀, 고품질, 고성능을 추구하는 최신의 기계 제품에서 진동은 제품의 신뢰도를 불신케 하는 요인으로서, 가능한 감소시켜야 한다. 최근 산업분야의 모든 제품에 고품질을 요구하는 추세에서 기계적인 진동을 억제하는 기술은 그 수요가 점점 커지고 있다. 또한 제조 공정의 불안정에 의한 불량품 발생을 방지하기 위해서는 생산기계는 물론 제작과정의 중간제품에서 발생하는 진동도 최소화하여야 한다. 과거에는 진동을 감소시키는 방법으로 최적의 설계 변수를 선정하는 수동 제어방법이 주로 연구되었으나, 보다 확실한 진동 제어를 위하여 최근에는 피드백 루프(Feedback loop)를 이용하는 능동제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 진동 제어 기술을 이용하는 최근의 연구내용과 그 응용분야가 매우 다양하다. 최근 전자력에 대한 연구가 활발히 진행되면서 작업 현장 및 각종 기계계에 전자력을 이용한 시스템, 즉 능동 진동제어 시스템이 여러 분야에 적용되고 있다. 전자석을 이용한 비접촉성 배어링이나 고속전철의 자기부상 시스템등이 그 예이다. 하지만 진동 제어에 관한 연구에 있어서, 진동체 또는 센서와 구동기에서 발생하는 비선형성 때문에 실제 시스템 구축을 위한 시스템의 모델링에 있어서 많은 어려움이 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 비선형성을 최소화하여 전자석을 이용한 비접촉식 제어 방법에 대해 연구하고자 한다.

2.1.1 보의 굽힘 진동

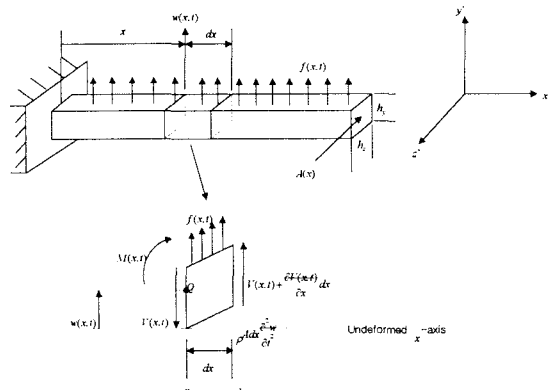


그림 2. 횡방향 진동을 하는 보와 그 보의 미소요소에 대한 자유물체도

2. 본 론

2.1 전체 시스템 구성과 외팔보의 운동 방정식

본 연구에서는 보(Beam)에 전자석을 이용한 비접촉식 형태의 실험장치의 제작과 함께 시스템의 모델링을 통해 전달함수를 구하였다. 아래 그림 1은 전체 시스템의 구조를 나타낸다.

$$M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}$$

$$V(x, t) = - \frac{\partial M(x, t)}{\partial x}$$

$$\left(V(x, t) + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} dx \right) - V(x, t) + f(x, t) dx = \rho A(x) dx \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2}$$

그림 2는 외팔보의 진동을 나타내고 있다. 즉, 변위 $w(x, t)$ 는 y 방향운동이다. 보는 사각형 단면적 $A(x)$, 넓이 h_1 , 두께 h_2 , 길이 l 을 갖고 있다. 또한 보의 굽힘 강성은 $EI(x)$ 이며, E 는 보의 탄성계수이며 $I(x)$ 는 z -축에 대한 면적의 2차 모멘트이다. 보의 굽힘 모멘트는 다음과 같은 관계식을 얻는다.

여기에서 굽힘 강성 $EI(x)$ 와 단면적 $A(x)$ 는 일정하고 외부의 힘 $f(x, t)=0$ 이라 가정하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = 0, \quad c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

여기에 다음과 같은 자유단과 고정단에서의 경계조건을 대입한다.

[자유단] : 굽힘모멘트 = $EI(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = 0$

전단력 = $\frac{\partial}{\partial x} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right] = 0$

변위 = $w(x, t) = 0$

[고정단] :

경사도 = $\frac{\partial w(x, t)}{\partial x} = 0$

그러면 다음의 해를 얻게 된다. 이는 진동체의 모드형태를 나타낸다.

$$X(x) = a_1 \sin \beta x + a_2 \cos \beta x + a_3 \sinh \beta x + a_4 \cosh \beta x$$

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI}$$

2.2 전자석(Solenoid)

본 연구에서는 진동체인 강철 외팔보를 제어하기 위한 구동기(Actuator)로 전자석을 이용하였다. 여기서 사용되는 전자석의 힘을 제어하기 위해서는 전자석, 즉 솔레노이드(Solenoid)의 특성에 관한 분석이 필요하다. 특히 전자석은 여러 가지 비선형성을 가지고 있기 때문에, 전자석의 힘을 제어하여 외팔보의 진동을 제어하기 위해서는 이러한 비선형성을 선형화 시키는 방법이 매우 중요하다.

2.2.1 전자석의 특성

전자석이 비선형성을 나타내는 두드러진 요인에는 강자성체의 자기이력 현상과 와전류에 의한 유도가열 현상이 있다. 또한 전자석의 힘은 물체와의 거리의 제곱에 반비례한다는 점도 대상인 외팔보를 제어하는데 있어서 제어를 힘들게 하는 요인이 된다

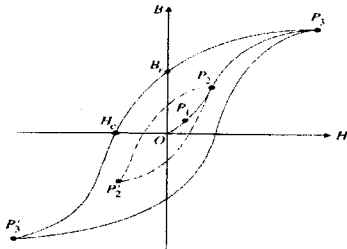


그림 3. B-H 곡선

강자성체의 자기이력 현상이란 위의 그림 3의 B-H 곡선에서처럼 인가 자계가 강할 경우 그 인가 자계를 제거해도 자속이 자성체에 남아 있게 되는 현상을 말한다. 이러한 문제점은 포화 자화점이 큰 물질을 사용하고 자석의 B-H 곡선이 선형적으로 나타나는 영역을 동작 영역으로 선택함으로써 해결하였다. 또한 시변자속이 강자성체의 코어를 흐를 때 유도기전력이 패러데이 법칙(Faraday's Law)에 따라 발생하게 되고 이 유도기전력은 자속에 수직한 도선 코어 내에 국부 전류를 발생시

켜 이 와전류에 의해 옴(Ohm)성 전력 손실을 일으키게 되는데 이를 와전류에 의한 유도가열 현상이라 한다. 이 유도가열에 의해 발생하는 열은 상당히 높으며 이 열로 인해 코어의 특성을 변화시켜 전자석이 선형적으로 동작하지 않게 된다. 이러한 와전류에 의한 유도 가열 현상은 큰 투자율(Permeability)을 갖고 작은 도전을(Conductivity)을 갖는 물질인 규소강판을 적용하여 코어로 사용함으로써 해결하였다.

2.2.2 전자석 제작

그림 4는 실제 전자석 제작에 사용한 코어의 모양과 크기를 나타낸다. 여기서 코어를 막대형이 아닌 E자형의 코어를 사용한 것은 공기중으로 손실되는 자속의 누설을 줄이기 위해서이다. 여기서 그림 4(b)는 규소강판을 적용한 형태를 나타낸다.

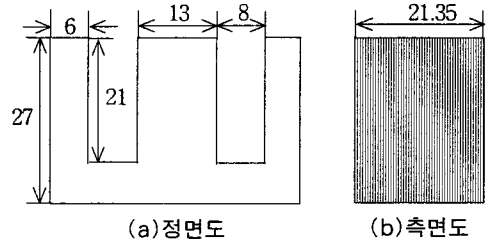


그림 4. 전자석 제조에 사용된 코어 (단위:mm)

2.2.3 전류와 전자석 힘과의 관계

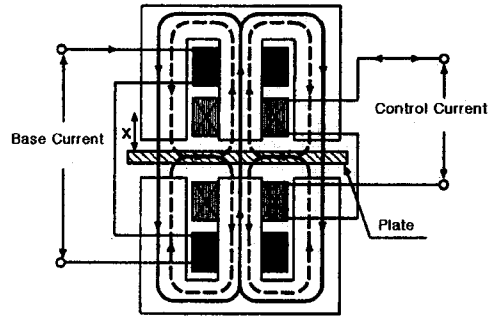


그림 5. 코일의 권선모양과 전류의 연결

코일을 N 회 감은 전자석에 전류 I 가 흘러 이로 인해 자속 Φ 가 생성될 때 전자석의 힘의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다. (단, 여기서 S 는 코어의 단면적, μ_0 는 공기중의 투자율을 나타낸다.)

$$F = F_0 = F_1 = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S}$$

여기서 $\Phi = BS$ 이므로 이를 위의 식에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$F = \frac{B^2 S}{\mu_0}$$

이로부터 전자석의 힘은 자속밀도 B 의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 여기에서는 그림 5에서와 같이 외팔보의 진동을 제어하기 위해서 전자석을 빔의 위와 아래에 같은 거리에 설치하였다. 이는 자석은 철 성분의 물질을 잡아당기는 인력만이 작용하기 때문에 빔을 효과적으로 제어

하기 위해서이다. 여기에서 R 을 자기저항(Reluctance), 두 자석의 자속을 각각 Φ_1, Φ_2 라 하면 두 자속 Φ_1 과 Φ_2 는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_1 = \frac{N(I_0 + i_c)}{R} \quad \Phi_2 = \frac{N(I_0 - i_c)}{R}$$

여기서 자속 Φ_1 에 의한 자석의 힘을 F_1 , 자속 Φ_2 에 의한 자석의 힘을 F_2 라 하면 실제 자석에 미치는 전자석의 힘은 $|F_1 - F_2|$ 로 나타낼 수 있다. 위의 식들을 정리해 보면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$F = |F_1 - F_2| = \frac{4N^2 I_0 i_c}{\mu_0 S R^2}$$

위 식에서 살펴보면 다른 항들은 모두 고정된 값이고 제어코일(Control coil)에 흐르는 전류만이 변하는 값이다. 전자석이 빔에 작용하는 힘은 제어코일에 흐르는 전류의 값에 비례함을 알 수 있다. 이는 코일에 흐르는 전류와 자속밀도가 비례한다는 가정하에 계산한 것이다. 실제로 제작한 전자석에 흐르는 전류와 자속밀도와의 관계가 그림 측정결과 비례함을 확인할 수 있었다. 이로써 위의 전류와 힘과의 관계를 적용할 수 있다.

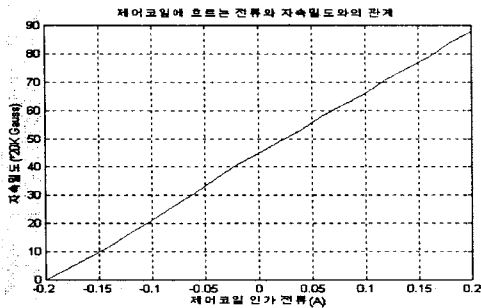


그림 7. B-I 관계

2.3 전자력과 동적 특성 실험

실험결과 외팔보의 고유 진동수는 35Hz로 실험 구간인 20Hz~40Hz는 2차 모드의 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 진동을 제어하기 위한 전자석은 Base Coil과 Control Coil로 분리되어 있는데, 제어시 Base Coil에는 항상 일정한 전류를 흘려보내게 된다. 따라서 외팔보의 동적 특성이 자력이 가해졌을 때와 가하지 않았을 때 어떻게 변하는지를 분석할 필요가 있다. 실험 결과 그림 7과 8에서와 같이 자력이 가해지면 외팔보의 고유 진동수와 진폭에 변화가 생김을 알 수 있었다. 고유진동수는 32Hz로 낮아지며, 진폭은 줄어들게 된다.

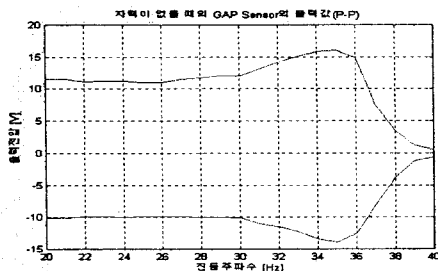


그림 8. 자력이 없을 때의 간극센서의 출력

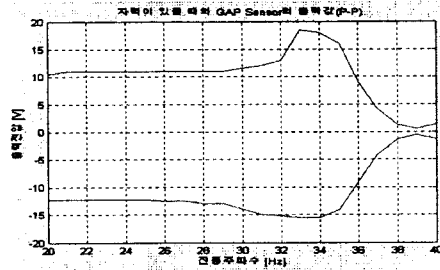


그림 9. 전자력이 있을 때의 간극센서의 출력

3. 결 론

진동은 기계의 특성상 항상 발생하는 현상이지만 이는 산업 공해 측면이나 고속, 고품질, 고정밀, 고성능의 제품 생산을 위해서는 반드시 줄여야 한다. 최근 산업분야의 제품들은 고품질을 요구하는 추세이므로 진동을 억제하는 기술은 그 수요가 점점 커지고 있다. 과거에는 진동을 감소시키는 방법으로 최적의 설계 변수를 선정하는 수동 제어방법이 주로 연구되었으나, 보다 확실한 진동 제어를 위하여 최근에는 피드백 루프(Feedback loop)를 이용하는 능동제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 진동을 제어하는 방법으로 전자석을 이용한 비접촉식 제어방법을 택하였다. 지금까지 접촉식인 피에조 소자를 이용한 제어방법에 대해서는 많은 연구가 이루어 졌지만, 비접촉식인 전자석을 이용한 진동체의 제어에 대한 연구는 미흡한 편이다. 본 연구에서는 진동체를 제어하기 위한 비선형성을 최소화한 전자석을 여러 번의 실험을 통하여 직접 제작하고 그 동적특성을 분석하였다. 시스템을 제어하기 위해서는 시스템을 수학적으로 모델링하여 전달함수를 구하여야 하는데, 진동 시스템 자체가 비선형성이 많기 때문에 이를 선형화하여 제어를 설계하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 이러한 비선형성을 선형화 하여 제어를 설계하는 일은 앞으로 연구해야 할 과제이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall, 2001
- [2] David K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics", Addition-Wesley, 1989
- [3] Okada, "Vibration control of thin steel sheet using flux feedback magnetic actuator", MOVIC '98, Zurich, Switzerland, August 25~28, Volume 3, 1998
- [4] Chang-Il Yang, "Design and control of 3 D.O.F actuator using the magnetic force of the electromagnet", 박사학위 논문, 연세대학교, 2000