

자기변형(3)

- 구동기의 이론적 모델링 -

이 호 철*

(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부)

자기변형(magnetostriction)에 관한 연재물 3번째로 이번 호부터는 본격적으로 자기변형 현상을 이용한 구동기(actuator)의 이론적인 모델링에 대해서 알아보기로 한다. 아직 필자의 이해의 수준이 '달인'의 경지에 이르지 않은 탓에 대부분의 내용은 기존의 논문의 내용을 요약 정리하거나 여러 논문들 간의 시각의 차이를 드러내는 방식으로 진행할 것임에 대하여 사전에 양해를 구한다. 또한 이 연재에서는 주로 구동기에 대한 내용을 언급하고 있으나 자기변형 물질 역시 피에조 물질과 마찬가지로 센서로 사용하는 것이 가능하기 때문에 이 연재에서 설명하는 내용은 센서를 설명할 때도 많은 경우 그대로 혹은 약간의 변형을 거쳐서 사용할 수 있음을 언급해둔다.

1. 자기변형 구동기를 해석하는 방법

그림 1은 뒤에서 언급할 논문들을 참고로 해서 자기변형 구동기에 대한 이론적인 해석을 할 때 고려해야할 내용들을 개념적으로 정리한 것이다. 그림에 표시된 변수들이 공간적인 변수는 포함하고 있지 않고 오직 시간변수 t 만을 포함하고 있는 것은 구동기의 종류에 따라서 표현할 필요가 있는 공간변수들이 워낙 다양하기 때문이다.

입력과 출력의 관계를 전달함수라고 표현하므로 정확한 구동기의 특징을 알기 위해서는 위에서 표시한 물리적인 법칙들이 모두 고려가 되어야 한다. 물론 대부분의 응용에서는 비선형적인 물리법칙들은 선형화를 통해서 완화시키고 히스테리시스와 같이 물리적 법칙 자체의 모델링

이 쉽지 않은 경우는 무시하는 방식을 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 현실이 그렇다고 하더라도 위의 그림에 표시된 내용에 대해서는 인지하고 있어야 할 것이다. 구체적으로 하나하나를 살펴보도록 하자.

1. $V(t)$ 와 $I(t)$ 의 관계 : 일반적으로 구동기의 제어는 전류신호에 비해서 다루기 쉬운 전압신호에 의해서 이루어진다. 하지만 실제로 자기장을 생성해주는 것에 직접 관련된 것은 전류신호이므로 구동용 회로에 걸어주는 전압과 실제로 자기장을 생성하는 장치(예를 들어 솔레노이드 코일 등)에서 발생하는 전류 사이의 관계를 명확하게 해주어야 한다. 많은 경우 논문에서 입력으로 전류를 사용하고 있는데 자기변형 장치를 구동하는 장치가

* E-mail : holee21@cu.ac.kr / Tel : (053) 850-2712

기초강좌

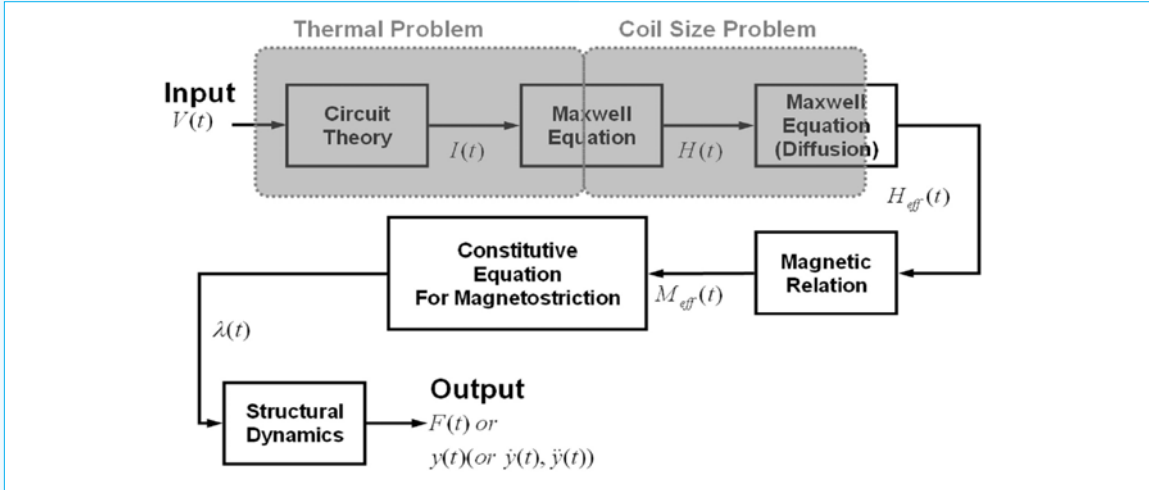


그림 1 자기변형 구동기의 이론적 모델구축을 위해서 필요한 물리적 지식들

일반적으로 높은 유도성분을 포함하고 있고 유도성분이 주파수가 높아짐에 따라서 임피던스가 비례적으로 커짐을 고려한다면 전류만을 고려한 설계는 위험할 수 있다. 임피던스가 커진다는 것은 같은 전류를 생성하고자 할 때 더 큰 전압을 필요로 한다는 이야기이므로 고주파의 경우에 상당히 큰 전압을 필요로 하게 되어 비실용적인 설계가 될 수 있다. 이 전압과 전류 사이의 관계를 구하기 위해서는 임피던스 해석을 포함하는 회로해석을 수행해야 한다.

2. $I(t)$ 와 $H(t)$ 의 관계 : 자기장을 발생시키는 장치(예를 들어 솔레노이드 코일)에 투입되는 전류와 이로 인해서 발생하는 자기장의 세기 사이의 관계를 알아내야 한다. 일반적으로 많이 사용되는 솔레노이드 형태의 코일에서는 매우 간단한 형태의 관계가 성립하지만 모양이 복잡해지면 Maxwell 방정식을 직접 풀어야 한다.
3. $H(t)$ 와 $H_{eff}(t)$ 의 관계 : 이 관계는 사실 2번

에 포함될 수도 있으나 이해의 편의를 도모하기 위해서 별도의 과정으로 언급하였다. 그림에서 'Maxwell Equation(Diffusion)'으로 언급된 것은 교변 자기장으로 인해서 발생하는 소위 'Eddy Current' 효과를 고려하는 과정을 나타낸다. 이는 교변자기장의 주파수가 낮은 경우에는 큰 문제가 되지 않으나 주파수가 높아질수록 실제 자기변형 구동기에 가해지는 자기장의 세기를 작게 함과 동시에 위상 지연까지 발생하게 되므로 고려해 놓아야 한다. 그림 2의 (a)에 그 효과에 대한 결과를 보였다.

4. $H_{eff}(t)$ 와 $M_{eff}(t)$ 의 관계 : 외부에서 걸어주는 자기장은 자기변형 물질에 자화현상을 불러일으키며 이 자화현상이 자기변형 현상을 일으키게 되므로 이 둘 사이의 관계를 알아야 한다. 흔히 자화곡선으로 불리는 관계와 비슷하며(실제 자화곡선은 H 와 B 를 대상으로 한다.) 비선형성과 히스테리시스를 보여 이 둘 사이의 이론적 관계 자체가 매우 큰

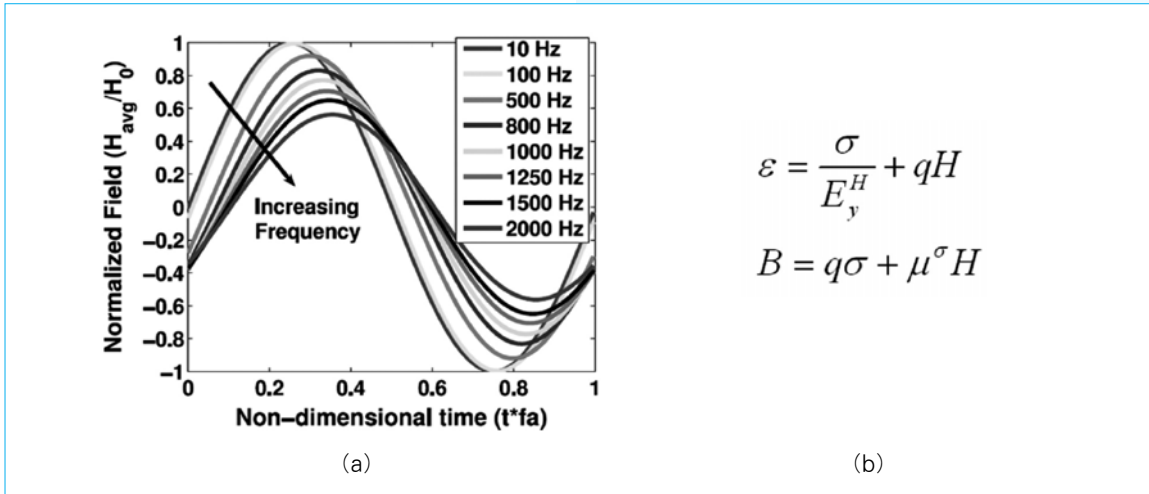


그림 2 (a) Eddy current의 영향, (b) 자기변형 현상의 구성방정식

연구 주제이기도 하다. 다행히 최근 들어 Jiles의 연구를 필두로 하여 많은 연구들이 이를 위한 이론적 배경을 제공하고 있다.

5. $M_{eff}(t)$ 와 $\lambda(t)$ 의 관계 : 이는 그림 2의 (b)에 보인 것과 같은 자기변형 현상 자체에 대한 구성방정식이다. 첫 번째 식은 자기장에 의해서 발생하는 변형률을 고려한 것으로 구동기의 해석에 사용하며 두 번째 식은 응력에 의해서 발생하는 자속밀도의 변화를 나타낸 것으로 주로 센서의 해석에 사용한다.
6. $\lambda(t)$ 와 $F(t)$ 의 관계 : 이는 자기변형 현상에 의해서 발생하는 변형률과 최종적으로 구동기에서 사용자가 얻고 싶은 출력과의 관계를 말한다. 자기변형 현상에 의해서 발생한 가진력이 같다고 하더라도 구조물을 어떤 모양으로 설계하는가에 따라서 매우 다른 출력을 얻게 될 것이므로 이를 파악하는 것은 매우 중요하다. 예를 들어 구동기에 사용된 자기변형 물질 및 이를 지지하고 있는 구조물의 고유진동수는 매우 중요한 설계변수가 된다.

해석 방법측면에서는 보다 간단한 집중질량 모델을 사용하는 경우도 있고 분포계 모델을 사용하는 경우도 있다.

그림 1에는 실선으로 표시된 블록 이외에도 점선으로 흐리게 표시된 부분이 있다. 이는 위에서 언급한 물리적인 입출력 관계로는 표시하지 못하지만 자기변형 구동기를 설계를 함에 매우 중요해서 꼭 고려해야 할 내용을 표시한 것이다. 먼저 온도문제다. 피에조 구동기와 달리 자기변형 구동기는 전류를 이용해서 구동하기 때문에 전류의 제공에 비례하는 열이 발생하게 된다. 열은 그 자체로도 문제지만 대부분의 특성들이 온도가 높아짐에 따라서 나빠지는 특성을 가지고 있기 때문에 구동기의 고성능화를 위해서 반드시 고려해야 한다. 두 번째로 고려해야 할 사항은 코일의 크기다. 이는 특히 소형 구동기를 만들 때 문제가 될 소지가 높다. 원하는 구동 성능(변위 혹은 힘)을 갖추기 위해서는 최대한 큰 자기장을 만들어주어야 하므로 가급적 많은 권선을 감아 주는 것이 좋을 것이지만 권선수가 늘어난다는

기초강좌

것은 결국 크기가 커진다는 것을 의미하며 동시에 인덕턴스 성분이 커져서 임피던스가 커지는 결과를 낳게 되어 함부로 크기를 크게 할 수 없다. 그러므로 이러한 실용적인 제한 조건을 살피면서 각각의 물리법칙을 고려할 수 있어야 한다.

2. 자기변형을 이용한 구동기 관련 논문들

필자가 자기변형을 이용한 구동기에 관한 다수의 논문들을 읽어보면서 느낀 것은 크게 2가지였다. 하나는 '정말 어렵군'이라는 느낌이었다. 이는 지적 능력을 논외로 한다면 필자의 학문적 기반이 독자들과 크게 다르지 않은 기계공학이라는 사실에 많은 부분 원인을 찾을 수 있지 않을까 싶다. 이번 연재 및 이어질 연재에서 알게 되겠지만 구동기란 센서와 더불어 메카트로닉스라는 분야가 다루는 가장 대표적인 주제인데 메카트로닉스라는 단어의 조성에서 알 수 있듯이 전기 혹은 전자공학적인 지식이 꽤 요구된다. 기계공학을 기반으로 하고 있는 연구자들이 넘어야 할 첫 번째 산인 것이다. 두 번째 느낌은 '왜 이렇게 헛갈려?'라는 느낌이다. 분명 뒤에서 언급하는 모든 논문들이 자기변형을 이용하는 구동기에 대한 이론적 모델링을 다루고 있지만 같은 저자가 쓴 논문을 제외하고는 어느 것도 접근 방식에서 공통점 혹은 일관된 체계를 발견하기가 쉽지 않았었다. 이는 아직 이 분야가 상용화와 관련해서 큰 성공을 거둔 사례가 많지 않다는 사실에도 기인하는 것으로 보인다. 먼저 이번 연재를 위해서 참고한 논문들과 해당 논문들의 내용을 짧게 언급해보겠다. 물론 이외에도 구동기로서의 자기변형 물질에 대한 논문은 무수히 많으나 다음에 언급한 논문만을 언급한 것은 이론적인 모델링까지 포함한 논문이기 때문이다. 또 다음에는 언급되지 않았으나 시간이 허락되는 상황이라

면 Calkins의 박사논문('Design, analysis and modeling of Giant Magnetostrictive Transducers')을 참고할 것을 권하고 싶다. 내용이 방대하여(무려 300쪽) 감히 읽을 엄두가 나지 않지만 거의 대부분의 내용을 망라하고 있다.

1. Hall, D. L. and Flatau, A. B., 1995, One-dimensional Analytical Constant Parameter Linear Electromagnetic-Magnetomechanical Models of a Cylindrical Magnetostrictive (Terfenol-D) Transducer, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.6 pp. 315~328 : 이 논문은 Eddy Current를 처음으로 자기변형 구동기에 도입하여 이론식을 도출한 논문이다. 그림 2에서 보았듯이 Eddy Current는 정확한 구동기 성능 예측을 위해서 매우 중요한 고려사항이다. 하지만 제목에서 알 수 있듯이 일부 파라미터를 상수로 설정하였으며 자기적인 비선형성이나 히스테리시스는 고려하지 않고 있다. 제목에 일차원이란 한정사를 달고 있지만 최근까지도 가장 많이 사용되는 형태의 구동기는 실린더 형태의 구동기이므로 이후의 논문에서도 2차원 이상으로 공간변수를 확장한 사례는 찾아보기 힘들다. 안타깝게도 기계적인 부분의 모델링(그림 1에 대한 설명에서 6번에 해당)까지 다루지는 않고 있다.
2. Dapino, M., Smith R. and Flatua, A. B., 2000, Structural Magnetic Strain Model for Magnetostrictive Transducers, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.36, No.3, pp.545~556 : Flatau와 Dapino는 자기변형 물질에 대하여 가장 방대한 연구를 진행한 연구자들 중 하나다. 이 논문의 특징은 일반적으로 자기적 현상이 가지고 있는 복잡함(비선형성 및 히스테리시스)으로 인해서 다루지

않았던 자화과정(magnetization)을 포함하여 구동기의 이론모델을 도출하고 이를 variational formulation을 이용해서 풀었다는 것이다. Eddy Current는 다루고 있지 않지만 분포계를 이용하여 구조물의 동적 특성까지 포함한 모델링을 제시하였다.

3. Pomirleanu, R. and Giurgiutiu, V., 2004, High-field Characterization of Piezoelectric and Magnetostrictive Actuator, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.6 pp. 315~328 : 자기변형 물질 및 이 물질과 경쟁하는 대표적인 지능형 재료인 피에조 물질을 비교하였다. 실제 전기회로에서 임피던스 문제도 다루고 있으며 block force를 다루고 있다는 특징이 있다. 2개의 물질에 대해서 정적인 특성과 저주파 출력 특성을 비교하고 있다. 한 가지 주의할 점은 피에조 물질과 자기변형 물질을 비교할 때 공통적으로 입력을 전류로 비교하고 있다는 것인데 이에 대해서는 다음 연재에서 구체적으로 언급하도록 하겠다. 구조물의 진동현상 모델링에는 마찬가지로 분포계 모델을 사용하고 있다.
4. Huang, W., et. al, 2007, Dynamic Strain Model with Eddy Current Effects for Giant Magnetostrictive Transducer, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.43, No.4, pp.1381~1384 : 자화곡선의 비선형 및 Eddy Current를 포함한 모델링을 시도하였으며 구조적인 부분에서도 집중 질량 모델이긴 하지만 이를 반영하였다. 3번과 비슷하게 입력을 가진 자기장의 세기로 하였기 때문에 실제 적용에서는 주의를 요한다.
5. Sarawate, N. and Dapino, M., 2008, Frequency Dependent Strain-Field Hysteresis Model for Ferromagnetic Shape Memory Ni-Mn-Ga, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.44, No.5, pp.566~575 및 (저자는 같음) 2008 A Dynamic Actuation Model for Magnetostrictive Materials, Smart Materials and Structures, Vol.17, doi:10.10088/0964-1726/17/6/065031 : 이 2개의 논문들에서는 Eddy Current 현상 및 자화곡선의 비선형성 그리고 집중 질량계를 이용한 구조모델링까지를 포함하고 있다는 점에서는 위의 4번과 같다. 하지만 추가적으로 Fourier 분석을 이용하여 각각의 harmonic 성분들이 시스템에서 어떻게 반영되는지를 보이고 있다는 점에서 차이가 있다.
6. Braghin, F., Cinquemani, S. and Resta, F., 2011, A Model of Magnetostrictive Actuators for Active Vibration Control, Sensors and Actuators A, Vol.165, pp.342~350 : 이 논문은 이번 연재에서 참고로 하고 있는 논문들 중에서 가장 최근 논문임에도 불구하고 위에서 언급했던 많은 부분을 생략하거나 선형화한 모델을 제시하고 있다. 자화곡선 및 자기변형과 관련된 구성방정식은 모두 선형 모델을 사용하고 구조 모델링도 집중 질량계를 사용하고 있다. 앞의 논문들과 차이점을 찾자면 능동제어 분야에 이를 적용하였다는 점이다.

이번 호에서는 앞으로 다루게 될 주제인 자기변형 구동기의 이론적 모델을 구함에 있어서 필요한 전체적인 개념을 이해하는데 도움이 되는 물리법칙들을 알아보고 대표적인 논문들과 그 내용적인 차이를 간단하게 알아보았다. 지면관계상 이번 호의 연재는 여기서 마치며 다음 호부터 본격적으로 이론모델을 알아보도록 하자. **KSNVE**