

실험계획법과 유한요소법을 이용한 자기변형 구동기의 최적 설계 Optimal Design of Magnetostrictive Actuator Using Experimental Design and Finite Element Analysis

*#최형욱¹, 박영우¹ 지기현¹

*#H. W. Choi(cchw@naver.com)¹, Y. W. Park¹, K. H. Ji¹

¹충남대학교 BK21메카트로닉스 사업단 메카트로닉스공학과

Key words : Magnetostrictive Actuator, Finite Element Analysis, Experimental Design

1. 서론

기술의 세계적인 추세는 “smaller, faster, cheaper” 로 요약할 수 있으며, 이러한 추세를 반영하여 MEMS(micro electro mechanical systems)와 같이 소형화 되면서 기계적 요소와 전자적 요소를 통합한 메카트로닉스 시스템의 개발이 활발해지고 있다. 이러한 기술의 흐름에 따라 μm 또는 nm 수준의 분해능을 갖는 마이크로 구동기(micro actuator)의 필요성은 증가하고 있다. 마이크로 구동기는 구동기 내에 사용되는 재료의 탄성 변형 특성을 이용하므로 마찰에 의한 영향 및 백래쉬가 없으며 분해능을 가진다. 이러한 마이크로 구동기에 사용되는 재료에는 압전 재료(piezoelectric material)와 자기변형 재료(magnetostrictive material)가 있다. 일반적으로 압전재료를 많이 사용하지만, 자기변형 재료는 압전 재료가 가지고 있는 피로현상과 에이징이 없고 출력이 큰 장점을 가져 현재 사용이 증가하고 있다 [1]. 자기변형 구동기는 자기변형 재료 주변에 코일을 감고 전류를 흘려 형성된 자기장에 의해 변위와 힘이 발생하는 자기변형 특성을 이용하게 되는데 이 특성은 자기변형 재료에 가해지는 예압에 따라 달라지는 특징이 있다. 따라서 자기변형 구동기를 설계함에 있어서 예압의 특성에 따른 예압 최적화와 자기 회로의 최적화가 필요하다. 본 논문에서는 유한요소법(Finite Element Analysis)을 이용하여 자기변형 재료에 자기장이 효율적이고 균일하게 분포하도록 자기 회로를 설계하였고, 실험 계획법을 사용하여 예압 및 영구 자석 등의 설계변수에 대한 설계를 진행하였다.

2. 유한 요소법

자기변형 재료에 코일과 영구자석에서 발생한 자기장을 효율적으로 전달되는 자기회로 구조를 상용 유한요소 해석 프로그램인 FEMM (Finite Element Method Magnetics)을 사용하여 해석하였다. 자기변형 구동기의 자기적 성질의 설계 변수로는 입력 전류(i), 코일 턴수(N), 영구 자석의 크기 및 세기, 자기장 경로 등이 있다. 일반적으로 자기변형 구동기의 자기 회로는 자기장의 경로에 의해 결정되며 이는 코일, 자기변형 재료, 하우징 및 영구 자석(PM)의 위치로 구성되며, 본 논문에서 자기 회로를 구분하는 요소는 자기장 경로에서 영구자석의 위치이다.

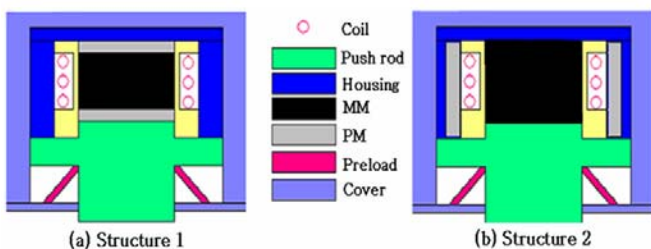


Fig. 1 Structure of Magnetostrictive Actuator

Fig. 1의 (a), (b)는 각각 두 가지 타입의 구동기 구조를 나타낸다. (a)와 (b) 모두 NdFeB계열의 영구 자석을 사용하였다. Fig. 1 (a)의 경우 디스크 타입의 자석을 사용하였고, (b)의 경우 링 타입의 자석을 사용하였다.

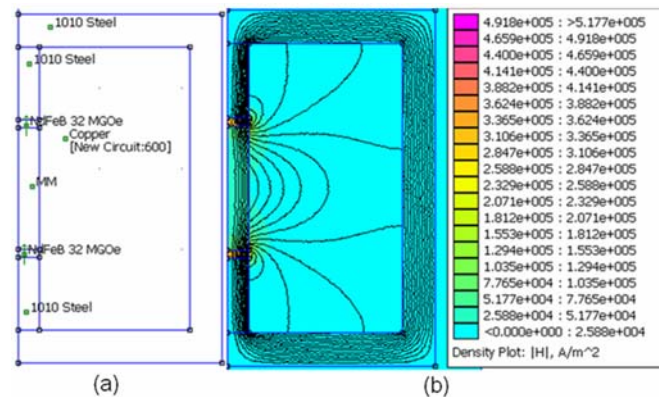


Fig. 2 FEMM analysis (a) Structure modeling (b) Simulation result (Structure 1)

Fig. 2는 Fig. 1. (a) (Structure 1)에 대한 FEMM 해석 결과이다. FEMM에서 Axisymmetric 타입으로 설계를 진행하였기 때문에 중심축에 대한 구동기의 반을 모델링하였다. 코일 턴수를 1000턴으로 하고 입력 전류를 0.5 A로 하고, $\phi 5\text{mm} \times 1\text{mm}$ 크기의 디스크 타입의 영구자석 2개를 사용하였다. Structure 1의 해석 결과를 보면 Flux leakage 현상과 자기변형 재료에 자기장이 효율적으로 인가되지 못하는 모습을 보여준다. 또한 자기변형 재료의 양 끝단과 중간 부분에 인가되는 자기장의 차이가 약 40 kA/m 만큼의 차이를 보여 균일하게 분포하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

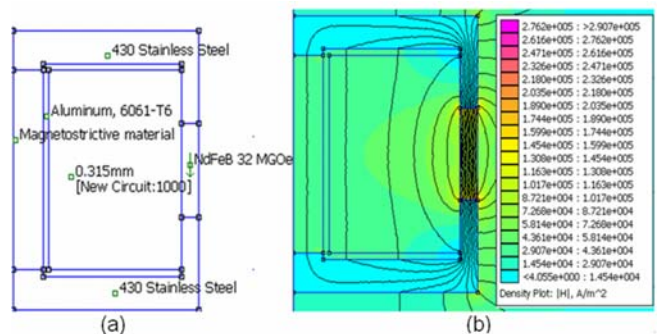


Fig. 3 FEMM analysis (a) Structure modeling (b) Simulation result (Structure 2)

Fig. 3은 Fig. 1. (b) (Structure 2)의 FEMM 해석 결과이다. Model 1과 같은 조건으로 Structure 2에서는 영구 자석을 링 타입으로 하여 $\Phi 28 \times \Phi 31 \times 7\text{mm}$ 크기를 사용하였다. 그 결과 Structure 2에서는 Structure 1에서 발생한 문제점이 발생하지

않으며 더 안정된 자기 경로를 가짐을 확인할 수 있다. 또한 자기변형 재료의 양 끝단과 중간 부분에 인가되는 자기장의 차이는 약 0.2 kA/m로 나타나 균일하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 유한 요소법을 사용하여 자기회로에 대한 설계를 Structure 2로 채택하였다.

3. 실험 계획법

실험계획법은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 그들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다 [2]. 본 연구에서는 최적설계를 위한 수치최적화 기법으로 요인배치법을 사용하였고, 분석은 상용프로그램인 MINITAB 15를 이용하였다. 본 논문에서는 자기변형 구동기의 설계 변수 중 구동기의 출력인 변위에 영향을 미치는 요인으로 예압, 영구 자석, 전류량을 설정하였다. 각 요인별 수준은 표 1과 같다.

Table 1 Condition of Experimental Design

요인	수준	값
예압	8	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 3, 5 (KSI)
영구자석	3	Φ28*Φ31*5mm, Φ28*Φ31*7mm, Φ28*Φ31*9mm
전류	3	0.25 A, 0.5 A, 0.75 A

각 요인과 수준에 따라 72번의 실험을 수행하였다. 72번의 실험은 Minitab 15에 따라 랜덤화된 순서로 진행되었으며 자기변형 구동기의 설계 변수 변경에 따른 구동기의 출력 변위를 측정하였다. Fig. 4는 자기변형 구동기의 설계 변수인 예압과 영구 자석, 전류가 구동기의 출력 변위에 미치는 영향을 주효과도표로 나타낸 것이다. 목적 값 변위에 대하여 예압, 자석 크기, 전류가 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 구동기의 변위에 영향을 미치는 인자는 전류, 예압, 자석크기 순으로 영향을 주고 있다. 입력 값 전류에 따라서는 변위가 선형적으로 증가함을 보였고, 구동기의 입력 전류를 제외한 예압과 자석 크기에서는 예압이 자석 크기에 비해 월등하게 영향을 줄을 알 수 있다.

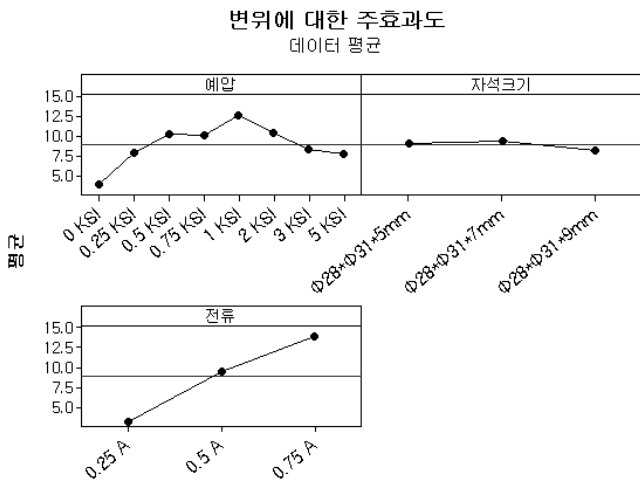


Fig. 4 Main Effect Plot for Displacement of Magnetostrictive Actuator

Fig. 5는 요인간의 교호 작용에 따른 변위 결과를 나타낸다. 예압, 자석 크기, 전류의 세 가지 요인에 대하여 교호작용 분석 결과 예압과 자석 크기 및 전류에 대하여 각각 독립적인 결과를

얻을 수 있었다. 즉 예압과 자석 크기 간의 교호작용도 분석 그래프를 보면 각각의 예압에 따라 자석 크기가 미치는 영향이 독립적으로 나타남을 확인할 수 있어 Fig. 4의 주효과도와 유사함을 보였다. 결론적으로 자기변형 구동기의 설계에 있어 설계 변수들 간에는 독립성을 띤다고 할 수 있다. 따라서 자기변형 구동기의 최적 설계 변수는 Fig. 4의 결과에 의해 예압 1 KSI, 영구 자석의 크기 Φ28*Φ31*7mm로 나타난다.

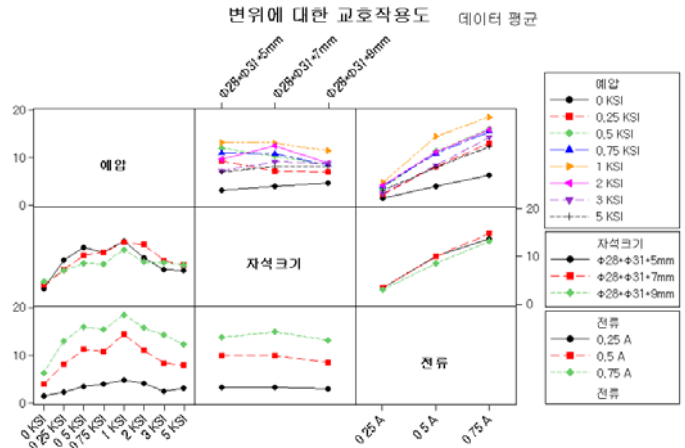


Fig. 5 Interaction Effect Plot for Displacement of Magnetostrictive Actuator

4. 결론

본 연구에서는 상용프로그램인 MINITAB을 활용한 실험 계획법과 유한요소법을 병행 사용하여 자기변형 구동기의 최적 설계에 대한 방안을 제시하였다. 자기변형 재료에 코일과 영구자석에서 발생한 자기장을 효율적으로 전달되는 자기회로 구조를 상용 유한요소해석 프로그램인 FEMM을 사용하여 진행하였고, 그 결과 디스크 타입의 자석 구조보다 링 타입의 자석 구조에서 안정된 결과를 얻음을 확인하였다. 그리고 통계적 해석을 통해 자기변형 구동기의 설계 변수의 조건 결정에 대한 자유도가 많아 예측이 어려운 점을 극복하고 기준 값을 설정하였다. 통계적 해석 방법으로 상용 프로그램인 MINITAB을 사용하였고, 이를 통해 자기변형 구동기의 설계 변수인 예압 및 자석 크기, 전류에 대한 실험 계획을 수립하고 이에 따라 구동기의 출력 변위에 미치는 영향도를 분석하였다. 그 결과 구동기의 출력 변위는 입력 전류에 대해 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었고, 예압 1 KSI, 자석 크기 Φ28*Φ31*7mm에서 가장 최적화된 결과를 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 중소기업청 산학공동 기술개발사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- 이석호, 박영우 “유한 요소 해석을 통한 자기변형 구동기 자기 회로 설계” 한국 정밀공학회 2004
- 김성, 최영석, 윤준용, 김덕수 “실험계획법을 사용한 원심펌프 임펠러 최적설계” 유체기계저널 11권, 제 3호, 2008