

전자장이론을 적용한 FEM해석에 의한 보이스코일 평판형 LOA설계

장석명*, 서진호*, 정상섭**, 박희창**, 문석준**, 박찬일**, 정태영**

* 충남대학교 전기공학과 ** 한국기계연구원

Design of the voice coil type LOA using FEM analysis

S.M. Jang*, J.H. Seo*, S.S. Jeong*, H.C. Park**, S.J. M**, C.I. Park**, T.Y. Jeong**

* Chungnam Nat'l Univ. ** KIMM

ABSTRACT

In this paper, it is treated the design and characteristics analysis of the voice coil type LOA which is composed of a voice coil type mover and permanent magnets. The design is accomplished using FEM analysis to make up the magnetic circuit. And the characteristics of LOA are analyzed to be used on the control system for the earthquake-proof experiments.

1. 서 론

리니어 진동 액츄에이터(Linear Oscillation Actuator, 이하 LOA)는 리니어 모터에 정현파 또는 구형파의 교변전압을 인가하여 가동체에 힘을 직접 발생시켜 직선 스트로크를 반복운동시키는 액츄에이터이다. 본 논문에서는 지진, 선박 등과 같은 대형 구조물의 진동을 흡수하기 위한 농동제어시스템 등에 응용할 수 있는 평판 보이스코일형 LOA에 관하여 다루었다.

평판 보이스코일형 LOA는 보이스코일형 가동체와 영구자석으로 구성되며, 발생주력은 공극자속밀도 B [T]와 가동코인에 여자되는 전류 I [A]에 의하여 로렌츠법칙으로 결정된다. 따라서 본 연구에서는 공극자속밀도와 전류 및 권선수가 최대가 될 수 있도록 FEM 해석을 통해 자기회로의 구조를 설계하였으며 이를 바탕으로 전기회로를 설계하였다. 그리고 실제 제작하여 제어시스템에 이용하기 위한 추력, 스트로크, 속도, 가속도 등의 특성을 해석하였다.

2. FEM 해석을 이용한 자기회로 구성

본 장에서는 적합한 자기회로 형상을 선정하기 위하여 전자장이론을 적용한 FEM 해석을 이용하였다. 먼저, 단일 영구자석 MQ30계열의 자기적 성질을 해석하고 그 결과로부터 몇 가지 모델을 정하여 그 특성을 각각 검토하여 자기회로 결정을 위한 자료로 얻기로 한다.

2.1 단일 영구자석의 자기적 성질

자기회로를 구성하기 위한 영구자석 재료로 최근 널리 쓰이고 있는 네오디뮴(NdFeB)자석은 고밀도의 에너지 저장이 가능하며, B-H특성은 계열에 따라 다르다. 본 연구에서 사용한 자석은 MQ30계열로 그림1과 같은 특성을 갖으며, 실제 LOA의 설계 및 제작에 사용할 자석 1개의 사양은 $5 \times 5 \times 2.5$ [cm³]의 치수를 갖는다. 이 자석의 감자자계특성등은 자로를 구성할 때 자기회로특성을 결정하게 되므로 자석근방에서의 자계분포특성을 파악할 필요가 있다.

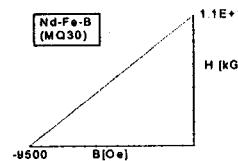


그림 1. MQ30계열의 B-H 특성

본 논문에서는 그림2(a)와 같은 단일영구자석 실체모델의 등신선(contour)에 대한 y-방향 자속밀도를 FEM 해석에 의해 구하여 그 해석치와 계측치를 비교하여 그림2(b)에 도시하였다. 그림2(b)에서 자속밀도 크기는 다소 차이가 있으나 중심부분보다는 바깥쪽 모서리 부분의 자속밀도가 더 커지는 경향은 동일하게 나타난다.

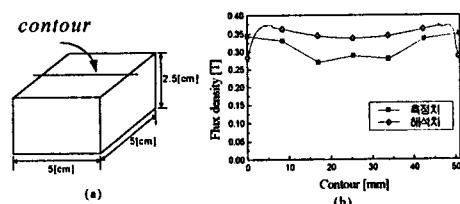


그림 2. (a) 실제 단일영구자석 모델 ($5 \times 5 \times 2.5$ [cm³])
(b) 해석치와 계측치의 비교

2.2 영구자석을 이용한 자기회로구성의 개념화

그림2(a)의 영구자석을 이용하여 자기회로를 구성할 때 세부설계에 앞서 자성체의 두께를 개략적으로 결정할 필요가 있다. 만약 영구자석의 감자가 없다고 가정하면 그림1과 같이 전류자속밀도가 $1.1[T]$ 이 된다. 따라서 50[mm]의 길이로부터 유이되는 영구자석의 자속을 받아 자기회로를 구성하기 위한 자성체의 두께는 순회의 포화자속밀도를 $1.8[T]$ 로 볼 때 최소한 30[mm]정도가 되어야 한다. 그 개념도를 그림3에 나타내었다.

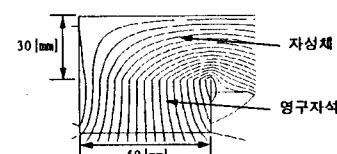


그림 3. 자성체의 두께를 결정하기 위한 개념도

2.3 자기회로의 형상을 정하기 위한 FEM 해석 및 검토
자기회로의 형상을 정하기 위해 기존의 여러가지 보이스코일 LOA 모델에 대한 FEM 해석을 적용하여 각 모델에 대한 공극 자속밀도를 구하고 그 중 최대값을 나타내는 모델을 선정하기로 한다. 이때 영구자석과 자성체 두께 및 공극의 뒷면적은 같은 값을 갖도록 한다. 그럼.4와 같은 영구자석의 위치가 다른 세가지의 대표적 모델에 대하여 FEM 해석을 한 결과 C 모델이 가장 큰 공극자속밀도값을 나타내었다.

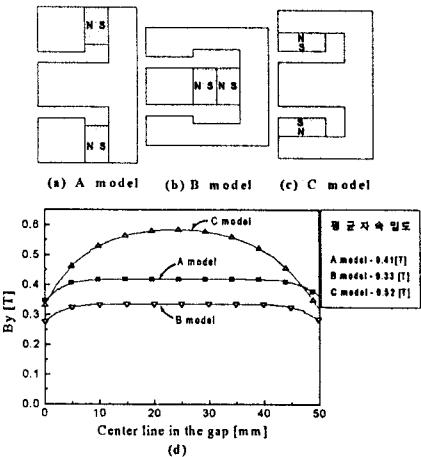


그림 4. 기본모델의 구조(a)(b)(c) 및 공극자속밀도의 비교(d)

이때 선정되는 자기회로는 기본 모델에 대하여 공극에 따른 공극자속밀도 변화와 자성체의 자기포화를 고려해야 한다. 그림.5는 그림.4의 C 모델에 대한 공극에 따른 공극자속밀도의 변화를 FEM으로 해석한 결과이며, 동심선은 공극의 중심을 지나는 직선으로 설정하였다.

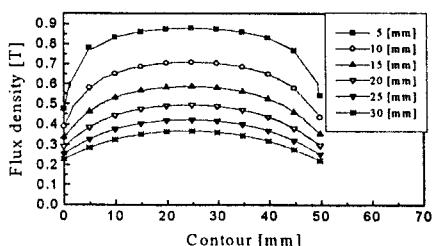


그림 5. 공극에 따른 공극자속밀도의 변화

선정된 기본모델에서 공극은 공극자속밀도와 기자력을 결정하는 중요한 변수가 된다. 즉 그림.5에서 알 수 있듯이 공극의 크기에 따라 공극자속밀도가 변화해 되며 공극에는 전류가 흐르는 가동모인이 놓여지게 되므로 기자력도 달라지게 된다.

3. 보이스코일형 LOA설계

본 장에서는 부하17[kg]을 주파수 10[Hz], 스트로크 3.2 [mm]로 왕복운동 시킬 수 있는 LOA를 설계한다. 이와 같은 요구사항 일때 최대치 추력은 약 220[N]정도가 필요하다.

3.1 자기회로의 설계

요구추력을 발생시키기 위한 LOA 기본형상은 공극자속밀도가 가장 크게 나타나는 구조인 그림.4의 C모델로 선정하였다. 한편 공극이 커짐에 따라 자속밀도는 감소되는 반면에 공극에 놓여지는 가동자의 권선을 감을 수 있는 공간이 커져 기자력이 증가함에 따라 힘은 크게 발생한다. 이러한 특성을 검토하기

위하여 공극의 길이에 따른 공극자속밀도와 추력의 관계는 그림.6에 나타내었다. 즉 그림.6에서는 공극이 증가함에 따라 자속밀도는 감소하고 추력은 증가하는 것을 볼 수 있다

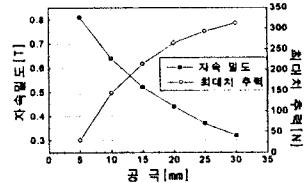


그림 6. 공극에 변화에 따른 공극자속밀도의 평균치 및 추력

그림.6의 공극에 따른 발생추력의 관계를 고려하여 요구추력을 발생시키기 위한 공극은 약 15[mm]가 적을 수 있다. 따라서 요구사항을 만족하기 위한 자기회로의 상세도인 그림.7은 그림.4의 C모델과 같은 형상에 그림.2(a)와 같은 단일자석을 3개 연결하고 폐자로를 이루는 자성체의 두께는 그림.3의 견과와 같이 30[mm]로 정하였다.

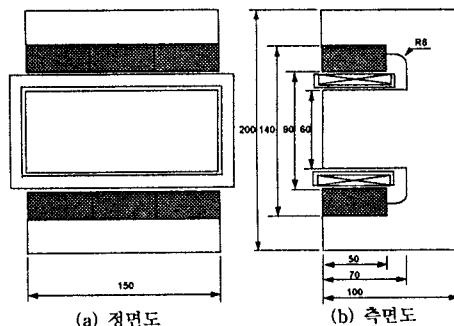


그림 7. 자기회로의 상세도

그림.8은 실제 제작한 모습을 사진으로 찍은 것이다. 또한 제작된 LOA에 대하여 FEM 해석의 타당성을 검토하기 위하여 그림.8과 같이 영구자석 표면의 자속밀도를 측정하여 해석치와 비교하여 도시하였다. 단일영구자석의 경우와 마찬가지로 실제 자속밀도가 FEM 해석보다는 다소 작게 계측되었다. 이것은 FEM 해석에 요구되는 B-H 특성과 실제 영구자석의 차지상태에 따른 자화특성의 상이함, 제작시의 가공과정, 계측오차 등에 의하여 발생된 것으로 추정된다.

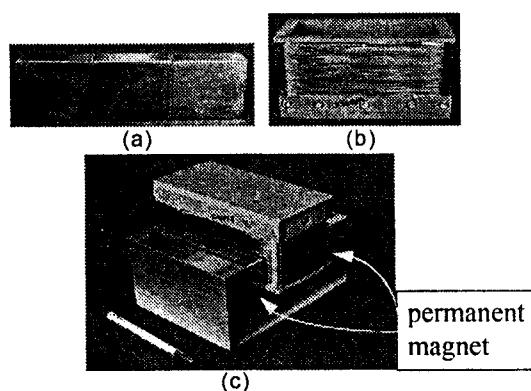


그림 7. 보이스코일형 LOA의 실제제작도

(a) 영구자석(Nd-Fe-B); (b) 가동자; (c) 조립도

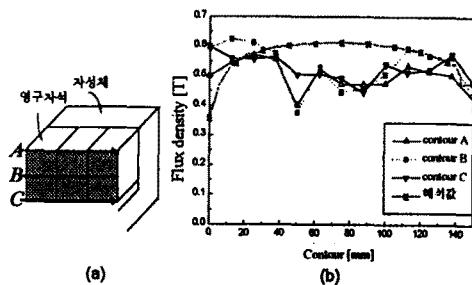


그림 8. 영구자석표면의 자속밀도에 대한 해석치와 계측치 비교
(a) 제작된 자석 표면의 등심선 (b) 등심선에 따른 자속밀도

3.2 전기회로 설계과정

요구사양과 3.1절에서 결정된 자기회로로 설계사양을 입력파라미터로 하여 코일 사양과 권선수 등을 결정해야 한다. 그림.9는 그 과정을 간략하게 흐름선도로 나타낸 것이다. 설계 결과 코일 직경은 1[mm]이고 영구자석이 만든 유효자장내의 코일턴수는 368[turns]이 된다.

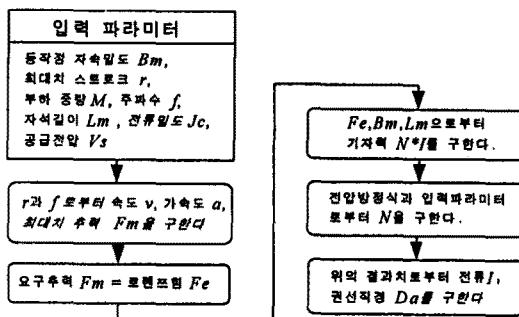


그림 9. 전기회로 결정과정의 흐름선도

4. 동특성 시뮬레이션 결과

3장에서 설계한 LOA의 동특성은 그림.10의 흐름도에 의해 시뮬레이션이 행해졌다.

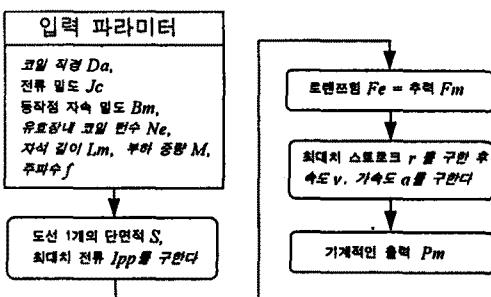


그림 10. LOA 동특성 해석을 위한 흐름도

4.1 순시특성

그림.11은 가동자에 17[kg중]인 부하를 담고 10[Hz] $J_p=4[A]$ 교류정현파 전류가 공급되는 경우의 스트로크·속도·출력·가속도·출력의 순시치를 나타낸 것으로 정현적 변화를 볼 수 있다. 다만 출력은 입력주파수의 2배가 된다. 구체적으로 스트로크는 3.2[mm], 속도는 0.2[%], 출력은 217[N], 가속도는 12.8 [%], 출력은 22[W]의 최대값들을 갖는다.

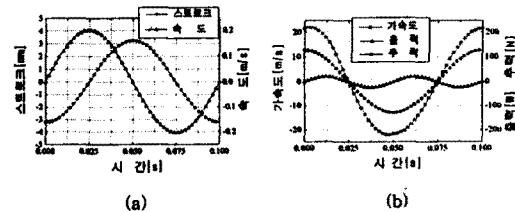


그림 11.(a)스트로크·속도 (b)가속도·출력·추력의 순시 특성

4.2 주파수와 부하에 따른 최대치 특성

입력전류와 부하증량을 4.1절의 값으로 유지하고 주파수만을 변화시켰을 때, 추력과 가속도의 최대치는 일정하지만 스트로크·속도·출력의 최대치는 그림.12(a)과 같이 주파수가 증가할 수록 감소한다. 또 전류와 주파수를 4.1절의 값으로 유지하고 부하만을 변화시켰을 때의 최대치 추력은 일정하지만 스트로크·속도·가속도·출력의 최대치는 부하가 증가할 수록 감소한다.

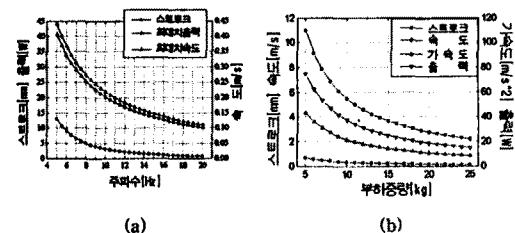


그림 12. 스트로크·속도·가속도·출력의 (a)주파수 가변

(b)부하 가변에 따른 최대치 특성

따라서 그림.13처럼 스트로크만 고려한 경우, 주파수 및 부하변화에도 불구하고 스트로크를 일정하게 유지시키고자 한 때는 기자력, 즉 전류밀도를 증감시켜 발생추력을 변화시켜야 한다.

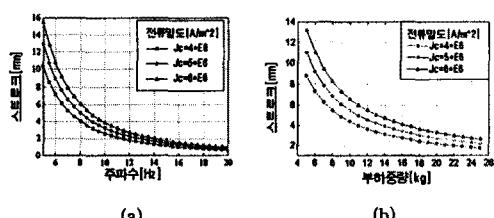


그림 13. 전류밀도를 고려한 경우 (a)주파수 가변 (b)부하 가변에 따른 스트로크 특성

5. 결론

본문에서는 보이스코일 평판형 LOA가 최대추력을 발생하기 위한 자기회로의 구조를 FEM 해석을 통해 설계하였으며 이를 바탕으로 전기회로를 설계하였다. 그리고 실제 제작하여 농동제어시스템 등에 응용하기 위한 기본자료를 도출하고자 추력, 스트로크, 속도, 가속도 등의 특성을 해석하였다.

참고문헌

- S.A. Nasar et al "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc., 1987
- "영구자석의 개발, 재료설계 및 자기회로의 해석, 설계 응용기술", 일본 종합기술 센터 발행