

3차원 유한요소법을 이용한 리니어 압축기에 사용되는 리니어 모터의 편심력 해석

이 현, 강제남, 왕세명, 홍언표, 박경배
광주과학기술원 기전공학과, LG전자 디지털 어플라이언스 연구소

Side force analysis of Linear Motor for Linear Compressor by using 3-D Finite Element Analysis

Heon Lee, Jenam Kang, Semyung Wang, Eon-pyo Hong, Kyeongbae Park
K-JIST(Kwangju Institute of Science & Technology), Digital Appliance Research Laboratory, LG
Electronics Inc

Abstract - Until recently, the 2-D FEA neglects the magnetic field fringing and end-leakage, it leads to the approach of a trial and error experimental design. Since 3-D FEA is investigated for exact side force analysis of Linear Motor for Linear compressor. For the 3-D FEA, ANSYS as commercial tool are used.

기울이지 않으면 각 부품들의 축이 어긋나 이로 인하여 힘의 불균형이 발생하게 된다. 이러한 여러 원인으로 인하여 편심력(Side force)이 발생할 수 있다. 따라서 축이 어긋남에 따른 편심력의 해석은 2차원으로 해석이 불가능하기 때문에 3차원에서의 접근이 필요하다.

1. 서 론

대부분의 산업체에서는 모터의 특성을 파악하기 위하여 일반적으로 많은 실험을 수행하게 된다. 하지만 이러한 방법은 모터의 구조나 사양들이 변함에 따른 반복적인 실험으로 인하여 시간과 비용 면에서 많은 부담이 되기 때문에 최근에는 유한요소해석을 동시에 고려하여 모터의 특성을 파악하고 있다.

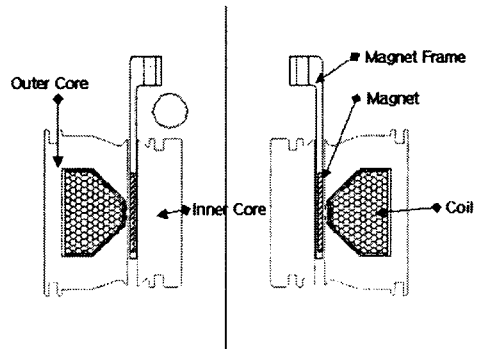


그림 1. 리니어 모터의 단면 구조 및 명칭

대부분 2차원 유한요소해석과 실험을 통하여 모터의 특성들을 파악하였는데, 이는 2차원 유한요소해석이 3차원 유한요소해석보다 모델링이 수월할 뿐만 아니라, 계산 속도 면에서도 대략 10배 이상 빠르기 때문이다 [1]. 그러나 2차원 유한요소해석은 자계의 프링징(Fringing)과 누설(End-leakage)을 무시하므로 이러한 영향들이 고려된 모터의 정확한 특성을 파악하기 위하여 3차원 유한요소해석이 필요하다 [2].

2.2 물성치

리니어 모터의 3차원 모델링을 위한 물성치는 6가지로 구성되어 있다. Inner Core, Outer Core, Magnet, Coil, Inner & Outer Ring, 그리고 모터부를 감싸는 Air이다. 표 1은 각각의 물성치들을 나타내고 있다.

본 논문에서 제시된 리니어 모터는 일반적인 사각형 구조를 가지는 리니어 모터와는 달리 원통형 구조로 구성되어 있다. 따라서 모터 부품들의 체결시, 각 부품들의 축이 어긋남으로 인하여 힘의 불균형이 발생하게 되며, 이러한 원인으로 인해 리니어 모터에 편심력이 발생하게 된다. 이렇게 발생된 편심력은 리니어 압축기 내부의 진동이나 소음을 발생시키는 원인이 될 수 있다.

ID	Name	μ_r	Resistivity [Ωm]	I[A]
1	Inner Core	BH Curve	-	-
2	Magnet		-	-
3	Outer Core	BH Curve	-	-
4	Coil	0.98	1.75E-08	1A
5	Inner & Outer Ring	1	7.20E-07	-
6	Air	1	-	-

따라서, 본 논문에서는 리니어 모터 내부 부품들의 편심으로 인해 발생하는 편심력을 3차원 유한요소해석을 이용하여 분석하였다.

표 1. 물성치

리니어 모터의 3차원 유한요소해석을 위한 해석기로서, ANSYS를 사용하였다.

2. 유한 요소 모델링

2.1 리니어 모터의 구조

리니어 컴프레서용 리니어 모터는 그림 1과 같이 바깥쪽으로부터 Outer Core, Coil, Magnet, Magnet Frame, Inner Core 등으로 구성되어져 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 본 연구에 사용된 모터는 축 대칭(Axis Symmetric) 2차원 유한요소해석으로 해석이 가능하다. 하지만, 본 연구에 사용된 리니어 모터는 일반적인 리니어 모터가 가지는 직선운동구조를 원통구조로 바꾸어 만들었기 때문에 모터 부품들의 체결시에 주의

Inner Core와 Outer Core는 자속 밀도가 어떤 값 이상이 되면 포화가 되어 더 이상 증가하지 않는다. 따라서 상대 투자율을 비선형으로 입력하였다.

2.3 유한 요소 모델

그림 2는 리니어 모터의 3차원 유한요소모델이며 총 69,361개의 SOLID 62 계열의 요소(Element)를 가지는 유한요소모델을 나타낸다.

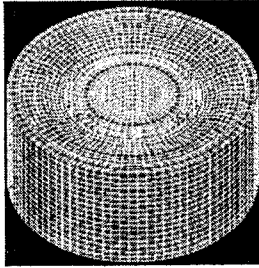


그림 2. 3차원 유한요소모델

유한요소해석을 위한 경계 조건은, 전자기 유한요소해석에서 고려할 수 있는 자속 수직 조건(Flux Normal Condition)과 자속 평행 조건(Flux Parallel Condition)의 두개의 경계 조건 중에서, Air 부분의 외곽에 분포하는 모든 절점(Node)에 벡터 포텐셜을 0으로 주는 경계조건을 주어서 자속선이 경계면 바깥으로 나가지 않도록 구속하는 자속 평행 조건을 주었다.

또한, 리니어 모터의 구동을 위한 자속을 발생시키기 위하여 Coil 부분에 1[A]의 전류를 Coil이 감기는 방향으로 인가하였다.

2.4 유한요소해석 결과

그림 3은 리니어 모터 전체에 나타나는 자속 밀도의 분포를 벡터로 나타낸 것이다. 그림 3을 통해 입력된 전류의 방향에 따라 자속선이 잘 흐르고 있음을 알 수 있다.

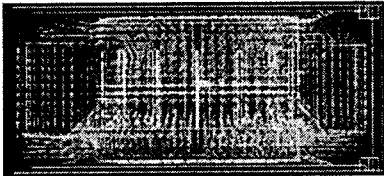


그림 3. 리니어 모터의 자속선

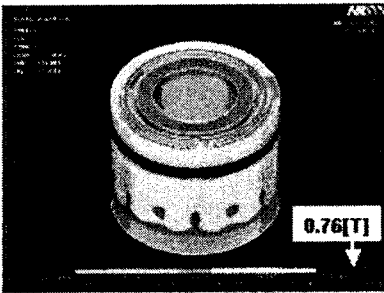


그림 4. Inner Core에서의 자속 밀도 분포

그림 4는 Inner Core에서 나타나는 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 자속 밀도의 최대값은 0.76[T]이다.

2.5 실험 결과와의 비교

ANSYS로 해석한 리니어 모터의 3차원 유한요소해석 결과를 검증하기 위해 그림 5와 같이 실험장치를 구성하였다.

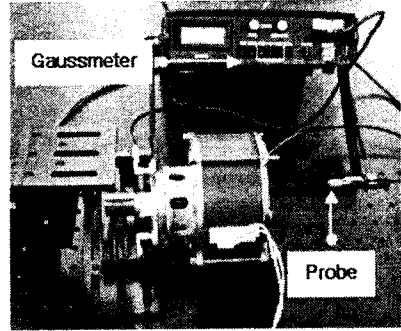
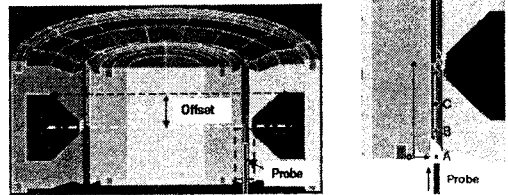


그림 5. 실험 장치

Gaussmeter를 이용하여 공극에서 발생하는 자속 밀도를 측정하였으며, 본 실험에 사용한 Gaussmeter는 Walker Scientific Inc.에서 만든 MG-5DAR이다. 측정범위는 ± 100.0 [Gauss], $\pm 1,000$ k[Gauss], ± 10.00 k [Gauss]가 가능하며, 정밀도는 측정범위의 0.05%이다.

공극에서 발생하는 자속 밀도를 측정하기 위하여 Gaussmeter의 프로브를 공극 사이에 넣어 주어야 한다. 이를 위해서는 충분한 공극의 깊이가 필요하다.



(a) 자석이 11.5mm 위치할 때의 단면도 (b) 자속 밀도 측정 위치

그림 6. 자속 밀도 측정을 위한 구조도

그림 6.(a)는 자속 밀도 측정을 위해 자석을 윗방향으로 11.5[mm] 정도 옮겼을 때의 단면도이다. 그림 7.(a)의 좌측에 나타난 것과 같이 Gaussmeter의 프로브를 모터의 하단부에서 삽입하여 공극에서 발생하는 자속 밀도를 측정하였다. 그림 6.(b)에서 A, B, C, D는 실험에서의 자속 밀도 측정 위치를 나타낸다. 측정 위치의 정밀도는 ± 0.5 mm이다. 표 3에서는 각 위치의 좌표값과 실험 및 해석 결과들을 비교하여 나타내었다.

표 3. 실험 결과 비교

	Dis. [mm]	Experiment[T]	FEA[T]	Error[%]
A	0	0.286	0.296	3.5
B	6.0	0.335	0.348	3.9
C	18.0	0.342	0.355	3.8
D	22.0	0.391	0.410	4.8

이 결과에서 알 수 있듯이 실험 값과 유한요소해석 결과들 사이의 최대 오차는 4.8%이다. 이를 통하여 리니어 모터 해석을 위한 3차원 유한요소모델이 상당히 정확함을 알 수 있다. 이를 통해, 리니어 모터의 편심력 해석을 위한 3차원 유한요소모델을 얻을 수 있다.

3. 편심력 해석

3.1 리니어 모터의 편심력 해석을 위한 문제 점의

실험과의 비교를 통하여 검증된 3차원 유한요소모델을 이용하여 Magnet과 그 밖의 나머지 모터 전체와의 동심도가 어긋나는 상황에서 모터의 동적인 상황을 고려하여 편심력 해석을 수행하였다.

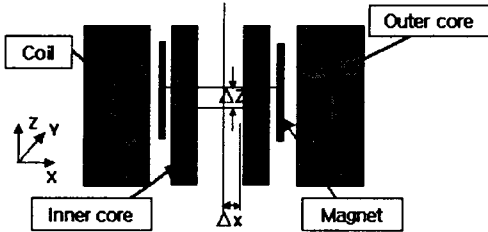


그림 7. 편심력 해석을 위한 모터 단면도

그림 7은 본 해석을 위한 모터의 단면도이며, 그림 7에서 x축의 방향은 편심력이 발생하는 방향이며, z축의 방향은 모터의 주된 힘(Axial Force)이 발생하는 방향이다. 이 단면도는 3차원 유한요소모델을 기본으로 하며, 해석을 위한 각 부분(Inner Core, Outer Core, Magnet, Coil)을 쉽게 인식하기 위하여 2차원으로 표현하였다. 그리고 Magnet과 그 외 나머지 부분들을 두 개의 서로 다른 국부 좌표계로 지정하여 상대적인 움직임을 표현하였다. 다시 말해서, Magnet의 국부 좌표계를 x, z축 방향으로 각각 움직임으로써 Magnet의 x, z축 방향으로의 움직임을 표현할 수 있으며, 각 위치에서의 유한요소해석을 통해 편심력을 확인할 수 있다.

또한, 리니어 모터의 동적인 상황을 고려하기 위하여, 인가되는 전류의 순간 전류값과 그에 따른 각각의 stroke를 그림 8의 전류와 stroke 관계 곡선을 통하여 전류값을 구한 후, 편심력 해석 수행시 얻어진 각각의 전류값을 인가하였다. Δz(Stroke)의 변화에 따른 전류값은 표 4에 나타내었다.

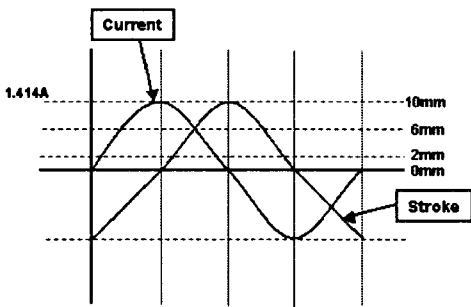


그림 8. 전류와 stroke의 관계 곡선

3.2 편심력 해석 결과

3차원 유한요소해석을 통한 편심력 해석의 결과를 표 4에 나타내었다.

Δx, Δz 가 모두 0일 때, 이론적으로는 x, y, z 세 방향으로 나타나는 힘은 0이 되어야 한다. 하지만 3차원 유한요소해석의 결과에서는 정확히 0이 나오지 않는다. 이는 3차원 유한요소모델 생성시 요소(element)의 비대칭에 기인한다. 다시 말해서 x, y, z 방향으로의 요소의 생성 모양이 완전 대칭이지 않기 때문에 x, y, z 세 방향으로 작은 힘이 발생하는 것처럼 보이는 것이다. 따라서, 본 논문에서 수행된 3차원 유한요소해석의 힘의 결과는 각 방향으로 0.3 ~ 0.4 [N] 정도의 오차를 가지고

있다고 볼 수 있다.

표 4를 통하여 모터의 동적인 상황에서의 편심력을 확인할 수 있으며, 그림 9로부터 알 수 있는 것은, Δx가 증가함에 따라 편심력인 F_x 가 음의 값을 가지고 지수함수(exponential function)적으로 증가된다는 것이다.

표 4. F_x 의 결과

		전류[A]				average
		1.414	1.3854	1.132	0	
		Δz[mm]				
		0	2	6	10	
Δx [mm]	0	-0.07569	0.03471	-0.3681	0.2284	-0.0452
	0.1	-5.7977	-4.9562	-3.8355	-4.6273	-4.8042
	0.2	-13.462	-11.472	-10.113	-10.339	-11.3465
	0.3	-24.752	-21.925	-18.024	-18.711	-20.8530
	0.4	-42.318	-40.416	-34.24	-31.93	-37.2260

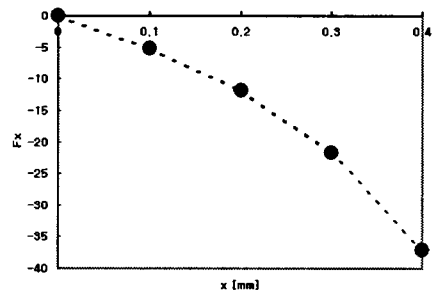


그림 9. Δx의 변화에 따른 편심력 F_x 의 변화

4. 결 론

본 논문에서는 리니어 압축기에 사용되는 리니어 모터에서 발생하는 편심력 해석에 대한 연구가 수행되었다. 편심력 해석을 위해 리니어 모터의 3차원 유한요소 모델링을 ANSYS를 사용하여 생성하였으며, 3차원 정자기 유한요소해석을 수행하였다.

공극에서 발생하는 자속 밀도의 측정 실험을 통해 3차원 유한요소모델을 검증하였으며, 검증된 3차원 유한요소모델을 가지고 편심력 해석을 수행하였다.

편심력 해석을 수행함으로써, 현재 사용중인 리니어 모터의 편심력에 대한 영향력을 파악할 수 있었다.

5. 후 기

이 연구는 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] E. Logcais, J-P. Yonnet, J-L. Coulomb, G. Meunier S. Gitosusastro. "Comparison between 3D, 2D finite element methods and analytical calculations for electromagnetic problems", IEEE Trans. on Mag., Vol. 24, No. 1, PP.66-69, 1988
- [2] Wu, W., Lovatt, H. C. and Dunlop, J. B., "Analysis and Design Optimization of Magnetic Couplings Using 3D Finite Element Modeling", IEEE Trans. on Mag., Vol.33, No. 5, PP. 4083-4085, 1997