

압력을 고려한 압축기용 선형 액추에이터의 동특성 유한요소해석에 관한 연구

°김기찬, 정인성, 윤상백, 현동석
한양대학교 전기공학과

A Study on the Dynamic Analysis of a Reciprocating Linear Actuator for Gas Compression Considering Pressure Using Finite Element Method

Ki-Chan Kim, In-Soung Jung, Sang-Baeck Yoon and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract – This paper presents the dynamic analysis of a reciprocating actuation system based on moving magnet actuator for gas compression. For the analysis of the linear actuator, an axisymmetric finite element method (FEM) considering the saturation effect of the magnetic material is used, and electrical circuit equation, mechanical dynamic equation and pressure dynamics are coupled. In the FE analysis, we adopt a moving line technique. The pressure dynamics of the gas in the compressor is modeled by using the law of thermodynamics. The analysis results are compared fairly well with experimental ones.

1. 서 론

회전형 모터를 사용한 압축기는 발전을 거듭하고 있으나 회전운동에서 직선운동으로 변환시 기계적 손실이 발생되는 단점이 있다. 이러한 손실을 줄여 보다 나은 효율을 얻고자 직선운동을 바로 이용하는 압축기용 선형 액추에이터가 필요하게 되었다[1].

압축기용 선형 액추에이터에서는 피스톤이 크랭크축에 연결되어 있지 않고, 기계계의 자연진동수와 전원의 강제진동수와의 공명을 이용하여 진폭을 증폭시키기 때문에 피스톤의 변위가 기하학적으로 결정되지 않는다. 또한 피스톤의 진폭과 중심위치는 이것에 작용하는 기계력, 전자기력 그리고 압력에 의해 결정되어진다.

액추에이터와 같은 전자기적 디바이스에 기계계의 운동방정식을 결합시킨 유한요소해석은 많이 연구되어왔다[2]. 그러나 압력을 고려한 압축기용 선형 액추에이터에 대한 연구는 아직까지 미비하다.

본 논문에서는 압축기용 선형 액추에이터의 동특성 해석을 하기 위해 철심의 포화를 고려한 축대칭 유한요소법을 사용하였다. 또한 전기계의 회로방정식과 기계계의 운동방정식을 결합시키고, 여기에 열역학 법칙을 이용하여 압력에 대한 알고리즘을

부가하였다. 유한요소해석에서 계산시간을 줄이고 효율적인 해석을 하기 위해 moving line 기법을 이용하였다[3].

2. 본 론

그림 1은 썬파워사의 압축기용 선형 액추에이터의 해석모델을 나타낸 것이다. 영구자석의 재질은 Nd-Fe-B이고, radial 방향으로 칙자되어 있다[4].

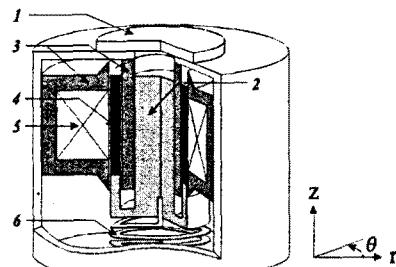


그림 1. 압축기용 선형 액추에이터의 해석 모델
(1.밸브 2.피스톤 3.적층된 철심
4.영구자석 5.권선 6.스프링)

2.1 동특성 유한요소 해석

2.1.1 유한요소 정식화

θ 방향에 대해 계의 현상들이 일정하므로 압축기용 선형 액추에이터의 동특성 해석으로 축대칭 유한요소법을 사용한다. 유한요소 정식화를 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

- 1) 전류와 자기벡터포텐셜은 θ 방향의 성분만이 존재하며, θ 방향으로 일정한 값을 가지고 있다.
- 2) 피스톤의 운동은 오직 z방향으로 왕복운동한다.
- 3) 철심은 이상적으로 적층되어있다. 즉 철심에서의 와전류 효과는 고려하지 않는다.
- 4) 영구자석의 도전율은 무시한다.

위의 가정과 맥스웰 방정식을 이용하여 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\nabla^2 \frac{1}{\mu} \vec{A} = -\vec{J}_0 - \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{M} \quad (1)$$

여기에서 μ 는 철심의 투자율이고, \vec{A} 는 자기벡터 포텐셜이고, \vec{J}_0 는 입력전류밀도, \vec{M} 은 영구자석의 잔류자속밀도이다.

식 (1)에서 $A_R (= rA_\theta)$ 법을 이용한 범함수는 다음과 같이 유도된다.

$$x = \int_s \left[\frac{1}{2\mu} \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_R}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_R}{\partial z} \right)^2 \right) - \frac{1}{r} J_{0\theta} A_R - \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial M_r}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial M_z}{\partial r} \right) \right] 2\pi r dr dz \quad (2)$$

범함수의 정유조건(즉, $\delta x=0$)을 적용시키면, 모든 요소의 계 방정식은 아래와 같이 된다.

$$\sum_{e=1}^N \{ [K]^e \{ A \}^e - [Q]^e \{ I \}^e - [M]^e \} = 0 \quad (3)$$

여기서 N^e 는 요소의 총 개수이다.

철심의 포화를 고려하기 위해서 자화곡선데이터로부터 투자율을 수렴시키는 반복법을 사용하였다.

2.1.2 회로방정식 적용

선형 엑츄에이터의 회로방정식은 다음과 같다.

$$v(t) = R i(t) + N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

여기서 $v(t)$ 는 입력전압, R 은 권선 저항, $N\phi(t)$ 는 권선의 쇄교자속수이다.

식 (4)의 우변의 두 번째 항은 역기전력을 나타내는데, 이것은 다음과 같이 전개된다.

$$N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{d}{dt} \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} \\ = 2\pi \sum_{e=1}^{N_s} \left[\frac{N \Delta^e}{3S} \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^3 A_{Rie} \right) \right] \quad (5)$$

여기서 N_s 는 권선 영역의 요소수, Δ^e 는 각각의 요소의 면적, S 는 권선 영역의 총 면적이다.

회로방정식은 행렬식으로 구성하면 다음과 같다.

$$\{ V \} = [R] \{ I \} + [G] \frac{d}{dt} \{ A \} \quad (6)$$

식(3)과 식(6)을 결합한 후 시간미분항에 대해 후퇴차분법을 적용하면 식(7)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} [K] & -[Q] \\ -[G] & -[R]\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'^{+At} \\ I'^{+At} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ -[G] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' \\ I' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M'^{+At} \\ -V'^{+At}\Delta t \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.1.3 압력 모델링

이상적인 가스 압축기에 대한 압력 모델링은 실린더 내부의 여유공간을 설명할 수 있는 간단한 수식으로 나타내어진다.

$$P \cdot V^n = k \quad (\text{constant}) \quad (8)$$

여기서 P 는 가스의 압력, V 는 실린더 내부의 부피, n 은 폴리트로픽 계수로서 가스의 종류에 의해 결정되는 상수이다.

피스톤이 회전형 모터에 부착되어 왕복 운동하는

경우에는 피스톤의 위치는 기계적으로 결정되어져서 P-V 사이클은 그림 2에 나타난 a-b-c-d순서로 오직 하나의 경로만이 존재한다. 그러나 선형 엑츄에이터의 경우, P-V 사이클의 경로는 피스톤의 운동에 따라 변화한다. 즉, 그림 2에서 보듯이 상수 k 가 임의의 값을 갖는다. 그림 3은 선형 엑츄에이터의 특성을 고려한 P-V사이클 모델에 대한 흐름도이다.

식 (9)는 실린더의 압축으로 인해 피스톤에 전달되는 힘을 나타내는 식이다.

$$F_p(k, z) = (P - P_{\min}) \times S \times g \quad (9)$$

여기서 P_{\min} 은 실린더의 최저압력, S 는 실린더의 단면적, g 는 중력가속도이다.

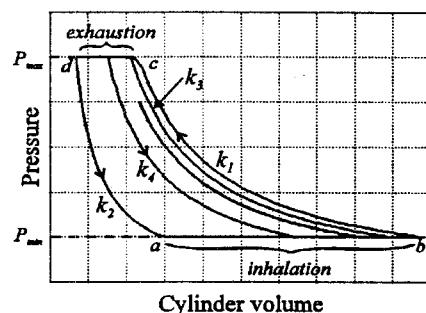


그림 2. 다중 경로를 가지는 P-V 사이클

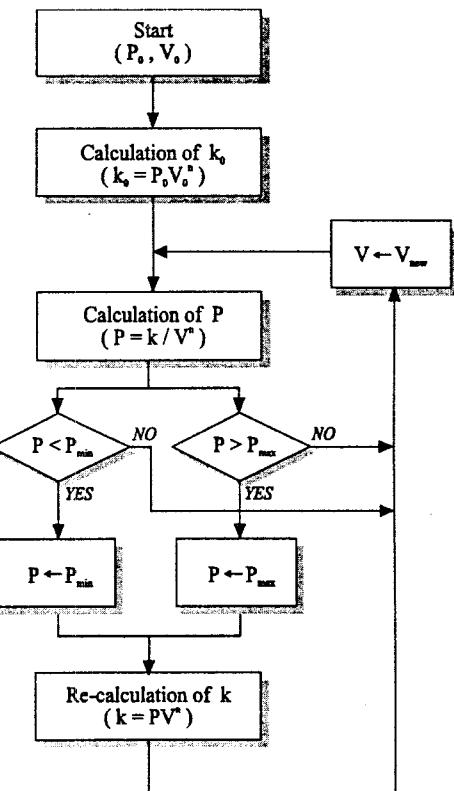


그림 3. P-V 사이클 모델링에 대한 흐름도

2.1.4 운동 방정식과의 결합

전기입력과 압력에 의한 힘을 강제력이라고 하면 이 계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + D \frac{dz}{dt} + K_s = F_m(I, z) - F_p(k, z) \quad (10)$$

여기서 m 은 이동부의 질량, D 는 기계적 감쇠정수, K_s 는 스프링 상수, F_m 은 전자기력, F_p 는 가스압력에 의한 힘이다. F_m 은 맥스웰응력텐서를 이용하여 계산하였다.

2.2 시뮬레이션 및 실험 결과

표 1은 압축기용 선형 엑츄에이터의 사양을 나타낸다. 압력부하를 인가했을 때 이로 인해 피스톤의 평형위치가 하사점 방향으로 변동된다. 이 현상은 스프링에 피로를 주고, 펌핑 효율도 떨어지게 된다. 따라서, 피스톤의 평형위치를 상사점 방향으로 약간 옮겨준다[5].

그림 4는 해석 모델의 자속분포도이다. 그림 5는 정상상태에서의 전류와 피스톤 변위의 해석치와 실험치를 비교함으로써 제안한 해석방법이 타당함을 알 수 있었다. 그림 6은 그림 5와 같은 시간에 발생되는 압력 양상이다.

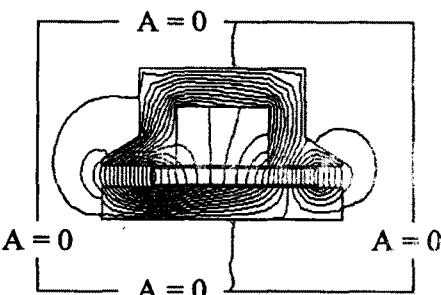


그림 4. 축대칭 유한요소법에 의한 자속분포도

표 1. 압축기용 선형 엑츄에이터의 사양

항목	값	단위
전압, v	110	(V _{rms})
입력전압 주파수, f	60	(Hz)
권선 저항, R	5.59	(Ω)
권선의 턴수, N	470	(turn)
실린더 단면적, S	5.067	(cm ²)
공극, g	0.5	(mm)
영구자석의 잔류자속밀도, M	1.1	(T)
감쇠계수, D	0	(Nsec/m)
스프링 상수, K_s	66,000	(N/m)
이동부의 질량, m	0.68	(kg)
계의 자연진동수, f'	49.58	(Hz)
최대압력, P_{max}	15.35	(kgf/cm ²)
최저압력, P_{min}	1.02	(kgf/cm ²)
풀리트로피 계수, n	1.16	

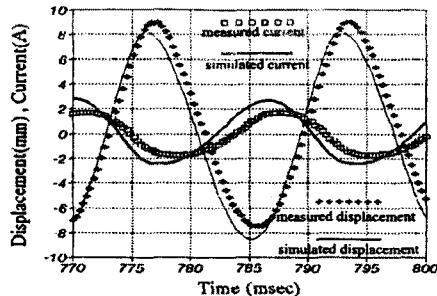


그림 5. 정상상태에서의 전류, 변위에 대한 시뮬레이션과 실험치

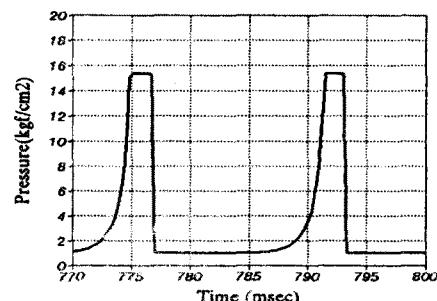


그림 6. 실린더 내부의 압력

3. 결 론

본 논문에서는, 압축기용 선형 엑츄에이터를 해석함에 있어 축대칭 유한요소법을 이용하였고, 회로방정식과 기계계 운동방정식이 결합되었다. 또한 여기에 열역학법칙의 P-V 사이클을 이용한 압력에 대한 모델링으로부터 압축기용 선형 엑츄에이터의 동특성 해석을 수행할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. E. Clark, D. S. Smith, P. H. Mellor and D. Howe, "Design optimization of moving-magnet actuators for reciprocating electro-mechanical system", *IEEE, Trans Magn*, vol. 31, no. 6, pp. 3746-3748, 1995
- [2] Bruno Lequesne, "Fast-acting, long-stroke solenoids with two springs", *IEEE, Trans on Industry Application*, vol. 26, no. 5, pp.848-856, 1990
- [3] Dal-Ho Im, Jung-Pyo Hong and Sang-Baeck Yoon, "A study on the optimum design of ladder type LIM considering space harmonics", *Proceedings of ISEM95*, 1995
- [4] Redlich, U.S. Patent 4,602,174.
- [5] Walt N. R and Unger R, "The simulation and design of high efficiency, lubricant free linear compressor for domestic refrigerator", *International Compressor Engineering Conference, Proceedings*, vol. 1, pp.1-9, Purdue Univ., July 1992