

스털링 냉동기용 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석

*정상섭, *윤인기, *장석명, **박성제, **홍용주
 * 충남대학교, ** 한국기계연구원

Dynamic Analysis of Linear Oscillatory Actuator for Stirling Refrigerator

S.S. Jeong, I.K. Yoon, S.M. Jang, S.J. Park, Y.J. Hong
 *Chungnam Nat'l Univ., **KIMM

Abstract - In this paper, the lumped electrical circuit approach of mass/spring system is used to model the mechanical aspects according to the frequency. Therefore, the mass/spring system can be dealt with here and linked with the equivalent circuit of electric linear oscillatory actuator(LOA). Analysis models are double-coil type linear compressor for stirling refrigerator. The compressor consists of the moving coil LOA, piston, and spring. The electro-mechanical system with mass and spring can be represented using the lumped electrical circuit. We present the system impedance and dynamics of moving coil linear compressor.

공급을 위해 리드선으로 외부와 연결되어 있다. 가동코일형 LOA는 두 개의 피스톤을 항상 반대방향으로 운동시켜 압축과 팽창 과정을 반복하게 한다. 그리고 이러한 압축 또는 팽창된 헬륨 기체는 연결관을 통해 팽창부로 이동하고 팽창부에서는 등온압축, 등적과정, 등온팽창, 등적과정을 거치면서 외부의 열을 흡수한다.

1. 서 론

적외선 센서 및 저온 센서 냉각용 극저온 냉동기는 ① 저진동, ② 낮은 소요동력, ③ 소형 경량, ④ 충분한 내구성 등의 조건을 만족해야 하므로, 현재까지 이상적인 냉동 사이클로서 많은 개발 사례가 있는 스텔링(Stirling) 극저온 냉동기가 주로 이용되고 있다. 특히, 민수용에서는 이동통신 무선 기지국에 사용되는 초전도 RF 필터의 냉각 시스템으로 미국, 일본 및 일부 유럽 국가 등에서 상용화를 목표로 개발 중에 있다. 그런데 극저온 냉동기의 압축기는 선형 압축방식을 사용하는데, 회전형 모터를 사용하는 경우 크랭크 축이 존재하므로 시스템의 단순화, 경량화 등이 어렵다. 따라서 리니어 왕복 액추에이터(LOA)를 주로 채택하는데 이는 극저온 상태에서 구동기구에서 발생하는 고화물질에 작동공간에 없는 Oil free화가 가능하고 축력(Side force)가 적은 압축형태이기 때문이다. 또한 지지구조 및 베어링의 접촉을 최소화하고 가동부인 피스톤을 중심에 용이하게 유지할 수 있으며 냉각온도를 일정하게 유지하기 위한 제어를 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 특히 LOA 중에서도 가동코일형이 가동자석형 보다 기술적 난이도가 낮아 생산비용이 적게 들기 때문에 군사용의 범용 스텔링 냉동기에서 선호하는 경향이 있다.

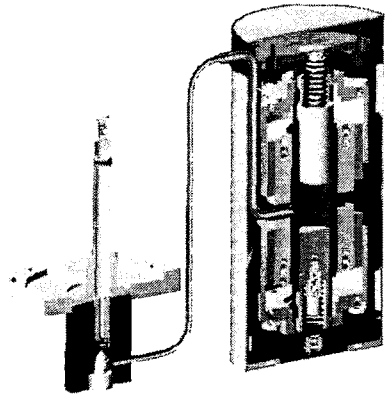


그림 1 Stirling 극저온 냉동기의 3차원 도면

본 연구에서는 극저온 스텔링 냉동기에 적용된 가동코일형 LOA의 동특성 해석하였으며 임피던스법에 의한 전기계 및 기계계 방정식의 모델링을 통해 냉동기를 포함한 가동코일형 LOA의 주파수에 따른 시스템 특성을 해석하였다.

2.2 가동코일형 LOA

그림 2과 표 1은 각각 스텔링 냉동기용 가동코일형 LOA 모델과 사양으로 LOA의 자기회로는 원통형이며, 양측에 영구자석과 가동자 코일, 내측과 외측 요크로 구성된다. 가동자 코일은 서로 같은 방향으로 감겨있고 동일 전원에 병렬로 연결되어 있으므로 전류 인가시에 좌우 코일은 서로 마주보는 방향으로 이동하여 냉매의 압축 및 수축의 효과를 갖는다. 영구자석은 SmCo를 사용하였으며 공급자속을 공급하기 위해 반경방향으로 자화된 6개의 아크형 자석편을 안쪽 요크에 부착시켰다.

2. 시스템 개요와 가동코일형 LOA 모델

2.1 시스템 개요

본 연구에서의 스텔링 극저온 냉동기는 그림 1과 같이 선형 압축기, 연결관, 기계적 구동부가 없는 팽창부로 구성된다. 특히, 선형 압축기는 스프링을 갖는 두 개의 피스톤과 이와 연결된 가동코일부, 영구자석 계자부, 내측과 외측 요크로 구성된다. 가동코일은 전원을

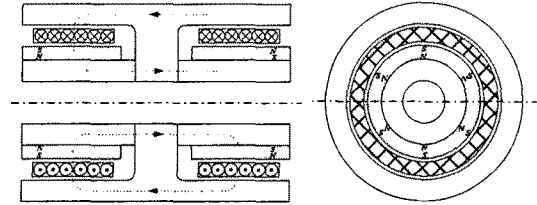


그림 2 냉동기용 가동코일형 LOA 모델

표 1 LOA 사양

항 목		사 양
기계적 사양	모터 길이	54 mm
	외반경	27 mm
	공극길이	2.25 mm
	기계적 공극 길이	0.25×2 mm
전기적 사양	모터용량	40 VA
	코일 직경	0.43 mm
	코일 턴수	28턴×4층=112
영구 자석 사양	주파수	50Hz
	두께	3.25 mm
	길이	20 mm
	재질	SmCo
	잔류자속밀도	11.6kG

2.3 전압·운동방정식과 상태방정식

그림 2는 리니어 모터로 구동되는 질량/스프링 시스템의 기계적인 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_T i - kx - C_d \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

여기서 M : 가동부 질량, k_T : 추력 상수, k : 등가 스프링 상수, C_d : 마찰계수, d^2x/dt^2 : 가동자 가속도이다. 또한 리니어 모터의 전압방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

여기서 $R, L, dx/dt$ 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다.

2.4 임피던스법에 의한 전기·기계계 모델링

속도 기전력과 전류 사이의 비를 운동 임피던스 (Motional Impedance), Z_m 로 식 (3)과 같이 정의한다(3).

$$Z_m = \frac{\omega^2 k_T^2 C_d}{(k - M\omega^2)^2 + C_d^2 \omega^2} + j \frac{\omega k_T^2 (k - M\omega^2)}{(k - M\omega^2)^2 + C_d^2 \omega^2} \quad (3)$$

따라서 리니어 왕복 액추에이터로 구동되는 질량/스프링 시스템의 전기계 임피던스 Z_e 와 기계계 임피던스 Z_m 의 합성인 시스템 임피던스 Z_s 는 식 (4)와 같다.

$$Z_s = Z_e + Z_m \quad (4)$$

3. 제어수 산정과 동특성 모델링

3.1 냉동기용 LOA 시스템의 제어수

표 2는 냉동기 LOA의 제어정수인데, 스프링 상수의 경우 실린더 내부 가스에 의한 스프링효과를 고려하지 않은 수치이다.

3.2 압력계를 고려한 등가 스프링 상수의 산정

압축기 실린더 내부의 압력, P 과 체적, V 의 곱은 식 (5)와 같이 항상 같다고 가정하자.

$$P \cdot V = \alpha \quad (5)$$

표 2 냉동기 LOA의 제어정수

제어 정수	값
코일 저항	1.7 Ω
코일 인덕턴스	6.7 mH
추력 및 유기전압상수	6.8823 N/A
질량	132 g
스프링 상수	2767.52 m/N

여기서 실린더 내부의 체적 V 은 식 (6)과 같다.

$$V = A \cdot (l - x) \quad (6)$$

여기서 A : 피스톤 단면적, l : 실린더 행정길이, x : 피스톤 변위이다. 따라서 실린더 내부의 압력에 대한 힘 F 는 식 (7)과 같다.

$$F = P \cdot A = \frac{\alpha}{(l - x)} \quad (7)$$

식 (7)을 테일러 급수를 이용하여 선형화하면 식 (8)과 같다.

$$F = \frac{\alpha}{l} + \frac{\alpha}{l^2} x \quad (8)$$

따라서 피스톤 변위에 따른 힘은 식 (8)의 오른쪽 두 번째항만 관련되므로 식 (1)의 운동방정식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_T i - (k + \frac{\alpha}{l^2})x - C_d \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

즉, 실린더 내부의 압력은 스프링 역할을 하며, 그 크기는 피스톤 행정거리와 실린더 압력과 체적의 곱에 관련된다.

3.3 유효 권선수를 고려한 동특성 모델링

LOA 모델은 단코일형, 즉 영구자석의 길이 l_m 보다 코일길이 l_c 가 짧은 모델로서 코일이 영구자석을 벗어나는 스트로크로 운전하게 되면 코일이 영구자석 자속에 영향을 받는 유효 권선수가 감소한다. 이는 추력 및 유기전압 상수가 위치함수로서 표현된다는 의미이며 결과적으로 추력의 감소를 야기시킨다. 실제 본 연구의 냉동기 LOA 모델의 경우 위와 같은 현상이 발생하므로 식 (10a)~식 (10c)와 같이 코일 위치 x 에 따른 유효 권선수 N_e 를 고려하여 특성을 해석해야 한다.

$$\textcircled{1} -\frac{l_c + l_m}{2} \leq x < \frac{l_c - l_m}{2} :$$

$$N_e = \frac{N}{l_c} x + \left\{ N + \frac{N}{l_c} \left(\frac{l_m - l_c}{2} \right) \right\} \quad (10a)$$

$$\textcircled{2} \frac{l_c - l_m}{2} \leq x \leq \frac{l_m - l_c}{2} : N_e = N \quad (10b)$$

$$\textcircled{3} \frac{l_m - l_c}{2} < x \leq \frac{l_m + l_c}{2} :$$

$$N_e = -\frac{N}{l_c} x + \left\{ N + \frac{N}{l_c} \left(\frac{l_m - l_c}{2} \right) \right\} \quad (10c)$$

여기서 l_c, l_m 은 코일과 자석 길이이다. 결과적으로 코일 위치에 따라 유효턴수가 변하므로 표 2의 추력 및 유기전압 상수가 변한다.

3.4 동특성 시뮬레이션 결과

그림 3은 상태 방정식 행렬에 의해 구성된 동특성 블록 다이어그램이다. 그림 4는 댐핑 계수 $\zeta = 0.5$ at 23 Hz, 피스톤 사이의 갭 = 18.3 mm, 충전 압력 = 20 kgf/cm² G, 입력 전압 = 8.7 V일 경우의 시뮬레이션 결과로 전압, 전류, 변위, 그리고 실린더 내부의 압력 변화이다.

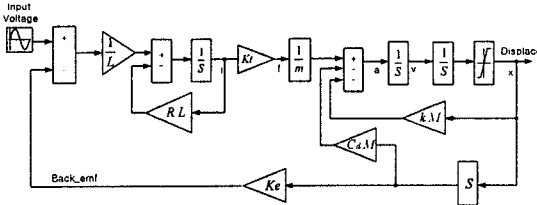


그림 3 동특성 블록다이어그램

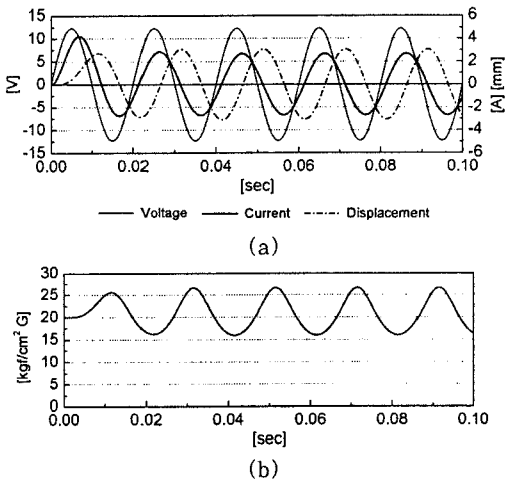


그림 4 동특성 시뮬레이션 결과
(a) 전압, 전류, 변위 파형
(b) 실린더 내부의 압력 파형

3.5 주파수에 따른 시스템 특성

그림 5는 주파수에 따른 시스템 임피던스 특성곡선으로 45 Hz 근처에 최대가 되어 공진점이 된다. 실린더 내부의 충전압력을 고려하지 않을 경우, 즉 무부하시에는 23 Hz에서 동일 임피던스 값을 갖고 최대를 가진다. 따라서 충전가스의 스프링 작용에 의해 공진점이 이동하였음을 알 수 있다. 또한 70 Hz 이상에서는 코일 인덕턴스에 의해 시스템 임피던스는 다시 증가하였다.

그림 6은 주파수에 따른 입력전류와 전력, 역률 특성이다. 입력전류는 공진점에서 최소가 되며 역률은 55Hz에서 최대를 가진다.

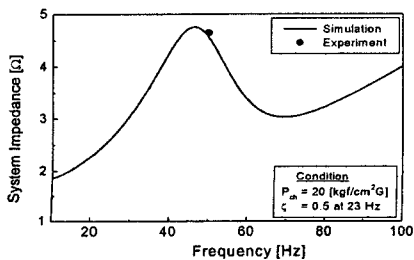
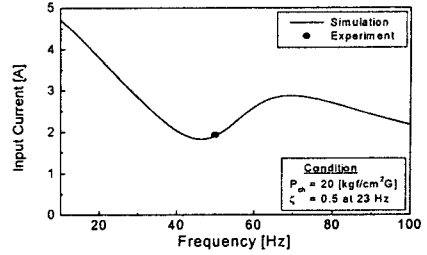
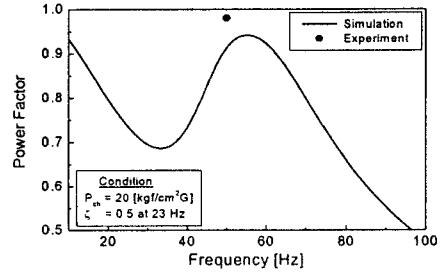


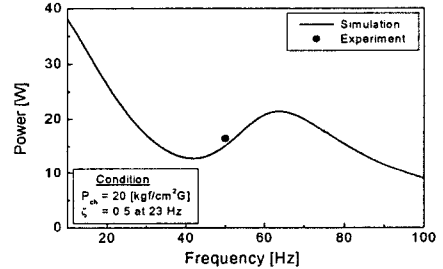
그림 5 주파수에 따른 시스템 임피던스 특성



(a)



(b)



(c)

그림 6 주파수에 따른 시스템 특성
(a) 입력 전류; (b) 역률; (c) 입력 전력

4. 결론

본 논문에서는 스텔링 냉동기에 적용된 가동코일형 LOA 시스템의 동특성 모델링하였다. 특히 실린더 내부의 충전 가스압력과 유효 권선수를 고려함으로써 좀 더 정확한 모델링과 해석이 이루어졌다. 또한 임피던스법에 의한 질량/스프링계를 모델링함으로써 가동코일형 LOA의 주파수에 따른 시스템 임피던스, 입력 전류 및 전력, 역률 특성을 예측하였다.

참고 문헌

- [1] A.S. Gaunekar, K.G. Narayankhedkar, S.L. Bapat, "Dynamic and thermodynamic analysis of doubly motorized miniature Stirling cryocooler using double coil linear motors", Cryogenics, Vol. 34, No. 1, pp43-50, 1994
- [2] R. Fair, H.R. Bolton, "Analysis and design of electromagnetic moving coil vibration generators", Electrical machines and drives, 1993, IEE
- [3] 정상섭, "진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석", 박사학위논문, 충남대학교, 2002