

리니어 컴프레서의 제어성능 향상

Control Performance Improvement for Linear Compressors

金奎植[†]
(Gyu-Sik Kim)

Abstract- A closed-loop sensorless stroke control system for a linear compressor has been designed. The motor parameters are identified as a function of the piston position and the motor current. They are stored in ROM table and used later for the accurate estimation of piston position. Also it was attempted to approximate the identified motor parameters to the 2nd-order surface functions. The 2nd-order surface functions are divided into 2 or 4 sub-sections for more precise identification of motor parameters. Some experimental results are given in order to show the feasibility of the proposed control schemes for linear compressors.

Key Words : Sensorless Stroke Control, Linear Compressor, Piston Position, Identified Motor Parameters, Surface Function

1. 서 론

일반 가정에서 냉장고의 전력소비는 전체 가정에서 소비하는 전력의 약 1/3가량을 차지하고 있으며 냉매를 순환시키고 열 교환을 수행기 위한 동력을 제공하는 컴프레서는 냉장고에서 소비되는 전기에너지의 대부분을 차지한다. 이와 같은 가정용 냉장고의 에너지 절감을 위해 고효율 컴프레서의 개발에 대한 많은 연구가 있어 왔다 [1-8].

그림 1과 같이 기존의 왕복동식 컴프레서에서는 회전하는 로터리 모터의 운동을 크랭크 축에 의해 직선으로 바꾸어 주는 반면, 리니어 컴프레서는 피스톤이 리니어모터에 의해 직접 구동되는 피스톤 타입 컴프레서이다. 리니어 컴프레서에서는 모든 구동 힘이 직선운동방향으로 가해지기 때문에 피스톤에 의해 측면방향의 미는 힘이 발생하지 않는다. 이에 따라, 기존의 왕복동식 컴프레서에 비해 마찰손실이 작고 운전 중에 소음이 작다[1].

또한, 회전운동을 직선운동으로 바꿀 필요가 없는 그림 2와 같은 리니어 컴프레서는 기존의 왕복동식에 비해 에너지 효율이 현격히 향상되어 레저용 소형 냉장고에서부터 가정용 냉장고, 그리고 에어컨에 이르기까지 그 응용범위를 넓혀가고 있다[7,8]. 리니어 모터의 동작원리는 그림 3에 있다. 교류전류가 커지면 자기장은 반시계 방향으로 점차 증가한다. (그림 3 ㉑) 이때, 자기장은 피스톤이 연결된 마그네트를 왼쪽으로 밀게 한다. 교류전류가 감소하여 0이 될 때, 이 마그네트는 가장 왼쪽지점에 도달한다. (그림 3 ㉒) 곧이어, 교류전류가 반대방향으로 흐르면 시계방향의 자기장이 발생하고 이는 곧 마그네트를 오른쪽으로 움직이게 한다. (그림 3 ㉓) 마지막으로, 교류전류가 다시 0이 되면 마그네트가 가

장 오른쪽 지점에 도달한다. 만일, 교류전류가 60Hz 라면 마그네트는 1초에 60번 진동할 것이다. 교류전류의 진폭을 키울수록, 마그네트의 진동폭도 커진다. 이는 곧 마그네트에 부착된 피스톤의 선형속도가 커짐을 의미하며 또한, 리니어 컴프레서의 냉매 유출율 (flow rate)도 이에 따라 커지게 된다.

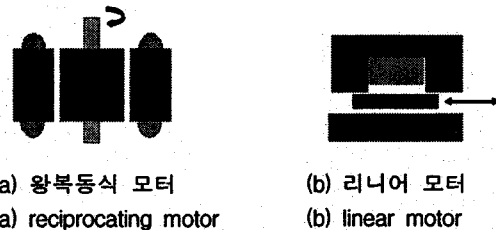


그림 1 왕복동식 모터와 리니어 모터의 동작비교

Fig. 1 Motion comparison of reciprocating motor and linear motor

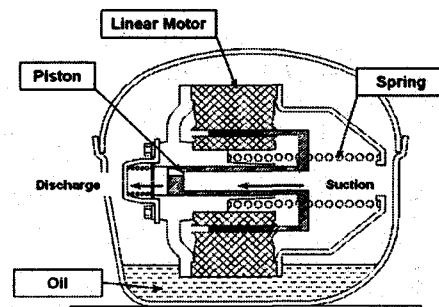


그림 2 냉장고용 리니어 컴프레서의 단면도

Fig. 2 Cross-section views of a linear compressor for refrigerators

[†] 교신저자, 正會員 : 서울시립대학교 전전컴학부 教授 · 工博

E-mail : gskim318@uos.ac.kr

接受日字 : 2006年 11月 2日

最終完了 : 2006年 11月 20日

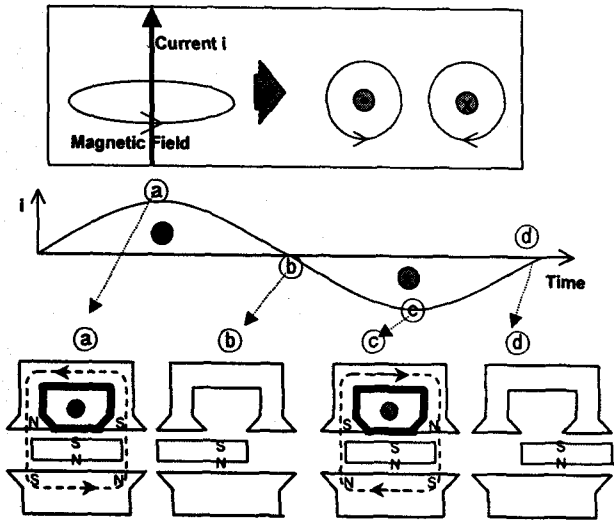


그림 3 리니어 모터의 동작 원리
Fig. 3 Operating principle of a linear motor

본 논문에서는 리니어 컴프레서를 위한 페루우프 센서리스 스트로크 제어시스템이 구성되었다. 피스톤 위치를 정확히 알아내기 위해 모터 매개변수를 피스톤 위치와 모터 전류의 함수로 추정하였다. 이 매개변수 데이터는 ROM 데이터에 저장한 뒤 차 후 피스톤 위치를 정확히 알아내는데 사용된다. 또한, 추정된 전동기 매개변수의 데이터 크기를 줄이기 위해 여러 형태의 곡면 함수로 근사화 하는 작업을 수행하였고, 실험을 통해 본 제어 방식이 리니어 컴프레서에 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

2. 스트로크 및 모터 매개변수 추정

기존의 왕복동식 컴프레서는 모터의 회전운동을 직선운동으로 바꾸어 주기 위해 크랭크축을 이용한다. 이로 인해 에너지효율은 떨어지지만 피스톤은 크랭크축에 의해 구속되어 실린더의 상단과 하단을 벗어남이 없이 안전한 동작을 유지한다. 그러나, 리니어 컴프레서에서는 기구적으로 구속되어 있지 않기 때문에 피스톤이 일정한 영역 내에서 안전하게 진동하고 실린더헤드를 때리지 않도록 피스톤의 스트로크를 제어할 필요가 있다. 또한, 냉각을 위한 냉매의 유출을 조절을 위해서도 피스톤의 스트로크 제어가 필요하다. 이를 위해서는 정확한 피스톤의 위치 정보가 필요하다. 정확한 위치를 측정하기 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 같은 위치측정 자기센서 들을 이용할 수도 있지만 이러한 센서들은 가격이 싸지 않을 뿐만 아니라 장착이 쉽지 않고 컴프레서 용기 밖으로 몇 가닥의 선이 나와야 하는 불편함도 있다. 따라서, 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 수 있는 효율적인 방법이 요구된다.

다음은 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 수 있는 한

가지 방법을 보여준다. 리니어 컴프레서 내에 있는 리니어 모터는 전기회로 등가모델로 나타낼 수 있으며, 회로 방정식은 다음의 식 (1)처럼 선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다. 리니어 모터의 추력 F_e 도 식 (2)처럼 선형식으로 표시할 수 있다.

$$\alpha \frac{dx(t)}{dt} + L_e \frac{di(t)}{dt} + R_e i(t) = v(t) \quad (1)$$

$$F_e(t) = \alpha i(t) \quad (2)$$

식 (1) 과 (2) 에서 α 는 리니어 모터의 추력과 전류사이의 관계를 나타내는 상수다. L_e 는 유효인덕턴스, R_e 는 유효저항, $v(t)$ 는 전원전압을, $i(t)$ 는 권선에 흐르는 전류를, 그리고 $\alpha \frac{dx(t)}{dt}$ 는 리니어 모터의 운동에 의해 권선에 발생하는 역기전력을 의미한다. 식 (1)을 $x(t)$ 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{\alpha} \left(v(t) - L_e \frac{di(t)}{dt} - R_e i(t) \right) \quad (3)$$

식 (3)을 적분한 피스톤 위치의 추정값 $\hat{x}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= \int_0^t \left(\frac{dx}{d\tau} \right) d\tau \\ &= \frac{1}{\alpha} \int_0^t [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau - \frac{L_e}{\alpha} i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 피스톤의 위치를 간접적으로 추정하고자 하는데 식 (4)에서 모터 매개변수인 α 와 L_e 가 피스톤의 위치나 모터전류에 따라 크게 변한다. 따라서, 이들 모터 매개변수인 α 와 L_e 를 일정한 상수로 가정하고 식 (4)를 이용하여 피스톤의 위치를 추정한다면 위치오차가 커지게 될 것은 분명해진다. 따라서, 가장 영향을 미치는 α 와 L_e 를 피스톤 위치 $x(t)$ 와 모터 전류 $i(t)$ 에 따른 함수로 추정하여 데이터베이스화 함으로써 피스톤의 위치추정오차를 줄이고자 한다. 식 (1)로부터 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\hat{\alpha} x(t) + \hat{L}_e i(t) = \int_0^t [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \quad (5)$$

식 (5)에 있는 $x(t)$, $i(t)$, $v(t)$ 는 각각 LVDT 와 같은 위치센서, 전류센서, 전압센서를 이용하여 직접 측정된 값이다. $\hat{\alpha}$ 와 \hat{L}_e 는 각각 α 와 L_e 의 추정 값이다. 한편, 피스톤이 좌우로 직선운동을 할 때 정상상태에서 한 주기를 t_n

이라 하고 이를 n 등분하여 각각의 시각을 $0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ 이라 하자. 그러면 다음과 같은 n 개의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} x(t_1) + \hat{L}_e i(t_1) &= \int_0^{t_1} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \hat{\alpha} x(t_2) + \hat{L}_e i(t_2) &= \int_0^{t_2} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ &\dots \\ \hat{\alpha} x(t_n) + \hat{L}_e i(t_n) &= \int_0^{t_n} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 정리하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{L}_e \end{bmatrix} = b \quad (7)$$

여기서, $n \times 2$ 매트릭스 A 와 $n \times 1$ 벡터 b 는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \begin{bmatrix} x(t_1) & i(t_1) \\ x(t_2) & i(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ x(t_n) & i(t_n) \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \int_0^{t_1} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \int_0^{t_2} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \vdots \\ \int_0^{t_n} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \end{bmatrix} \quad (8)$$

pseudo inverse를 이용하여 식 (7)은 다음 식 (9)와 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{L}_e \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (9)$$

3. 매개변수 데이터의 곡면 근사화

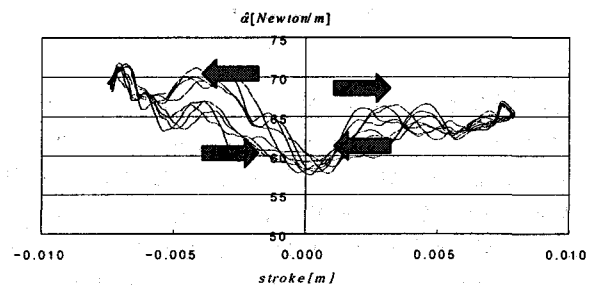
리니어 컴프레셔용 센서리스 제어를 실현하기 위한 cpu로는 TMS320C2000을 사용하였다. 리니어 컴프레서는 표 1과 같이 에어컨 용도로까지 사용할 수 있도록 개발된 2.2kW 급의 리니어 모터를 내장하고 있다. 정격 입력전압은 220Vrms이며 최초 실험을 위한 스트로크 명령치는 16mm로

하였다. 모터전압의 주파수는 항상 60Hz로 설정하였다.

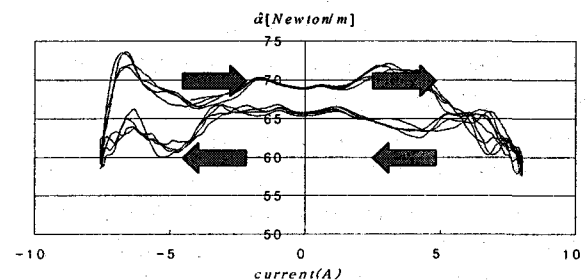
표 1 실험에 사용된 리니어 모터 사양
Table 1 Linear motor specifications used for experiments

정격 출력 파워어	2.2 kW
정격 입력 전압	220 Vrms
정격 전류	7 Arms
정격 스트로크	20 mm
전압 주파수	60 Hz
R_e	2.5 Ω
α	66 Newton/Amp
L_e	0.11 H

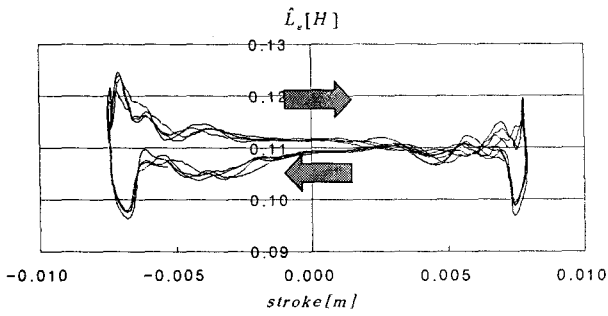
초기 기동상태를 지나 정상상태 상황에서 식 (9)에 의해 추정된 리니어 모터의 매개변수 $\hat{\alpha}$ 과 \hat{L}_e 이 그림 4에 있다. 스트로크나 전류의 변화에 따라 추정된 매개변수 $\hat{\alpha}$ 과 \hat{L}_e 가 심하게 변한다. 인덕턴스는 자속을 전류로 나눈 값이며 스트로크에 따라 인덕턴스가 바뀌는 것은 마그네트 때문이다. 마그네트가 중심에서 멀어질수록 마그네트 자속이 증가하고 여기에 전류에 의한 자속이 더해져 코어의 자속밀도가 달라지게 된다. 또한, 전류 증가시 코어가 포화되면 자속은 증가하지 않아서 전류 값이 어느 이상 증가하면 인덕턴스는 감소한다.



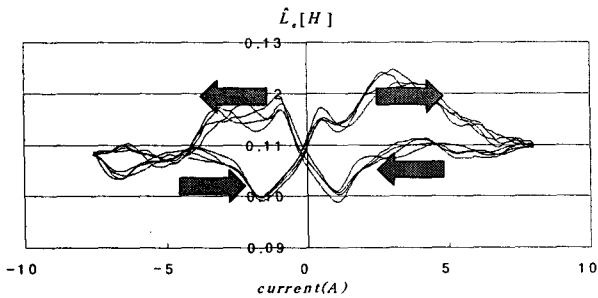
(a) 스트로크에 따라 변하는 추정치 $\hat{\alpha}$



b) 전류에 따라 변하는 추정치 $\hat{\alpha}$



(c) 스트로크에 따라 변하는 추정치 \hat{L}_e



(d) 전류에 따라 변하는 추정치 \hat{L}_e

그림 4 추정치 $\hat{\alpha}$ 과 \hat{L}_e 에 대한 실험 결과

Fig. 4 Experimental results for $\hat{\alpha}$ and \hat{L}_e

스트로크를 측정하기 위해서 피스톤 위치센서를 설치하는 것은 쉽지 않고 가격상승의 원인이 된다. 또한, 일정한 모터 매개변수로 가정하여 추정된 스트로크는 작지 않은 오차를 유발하였다. 반면, 추정된 모터 매개변수를 이용하여 계산된 스트로크 추정치는 상당히 작은 오차를 발생시켰다. 그러나, 이 방법은 추정된 모터 매개변수를 저장하기 위한 1Mbyte 정도의 커다란 메모리를 필요로 하는 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위한 방안들을 제시한다. 그림 5와 6은 각각 모터 매개변수의 추정치 $\hat{\alpha}$ 과 \hat{L}_e 에 대한 곡면도를 보여준다.

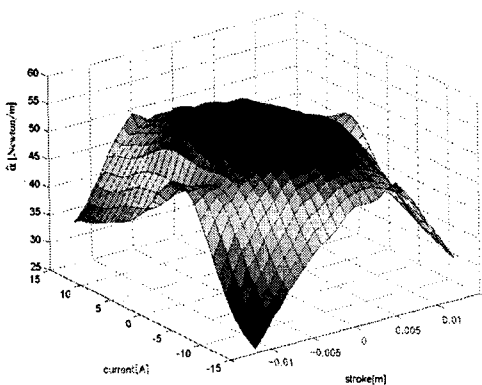


그림 5 추정된 매개변수 $\hat{\alpha}$ 의 곡면도

Fig. 5 Plot of identified parameter $\hat{\alpha}$

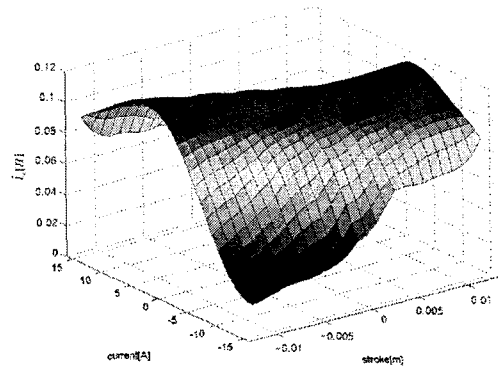


그림 6 추정된 인덕턴스 \hat{L}_e 의 곡면도

Fig. 6 Plot of identified inductance \hat{L}_e

그림 6의 곡면은 말안장의 형태를 보여준다. 추정된 인덕턴스의 데이터 수를 줄이기 위해 다음과 같은 2차 곡면식으로 근사화시킨다.

$$S(i, x, L) : L = c_0 i^2 + c_1 x^2 + c_2 i x + c_3 i + c_4 x + c_5 \quad (10)$$

여기서, i 는 전류변수이고 x 는 스트로크변수이며 L 은 2차 곡면으로 근사화 시킨 추정된 인덕턴스 함수를 나타낸다. 식 (10)의 c_i $i = 0, 1, \dots, 5$ 를 구하기 위해 추정된 인덕턴스의 n 개 데이터 세트를 $\{(i_0, x_0, L_0), (i_1, x_1, L_1), \dots, (i_{n-1}, x_{n-1}, L_{n-1})\}$ 라 하면 다음 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ \vdots \\ L_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0^2 & x_0^2 & i_0 x_0 & i_0 & x_0 & 1 \\ i_1^2 & x_1^2 & i_1 x_1 & i_1 & x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{n-1}^2 & x_{n-1}^2 & i_{n-1} x_{n-1} & i_{n-1} & x_{n-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)로부터 pseudo inverse 를 이용하여 식 (10)의 c_i $i = 0, 1, \dots, 5$ 를 쉽게 구할 수 있다. Matlab을 이용하여 그림 6과 같은 실제 데이터를 가지고 풀어보면 그림 7과 같은 2차 곡면으로 근사화시킨 추정된 인덕턴스 함수 L 을 얻을 수 있다. 그림 7과 같이 근사화된 추정 인덕턴스를 사용하면 메모리 공간이 6byte 면 될 정도로 크게 줄어든다. 같은 방법으로 그림 5를 2차 곡면으로 근사화 시킨 결과가 그림 8에 있다. 두 번째로, 추정된 매개변수 값들을 여러 구획으로 나눠 각각을 다른 곡면식으로 표현함으로써 좀 더 오차를 줄이는 접근방식을 알아보았다. 그림 6을 각각 2개, 4개의 영역으로 나눠 위에서 내려다 본 것이 그림 9에 있다. 이처럼 그림 6의 \hat{L}_e 을 그림 9와 같이 2 혹은 4구간으로 나눠 근사화된 추정인덕턴스 L 을 구한 것이 그림 10에 있다.

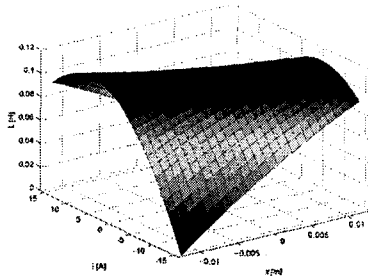


그림 7 근사화된 추정 인덕턴스 L 의 곡면도
Fig. 7 Plot of approximated identified inductance L

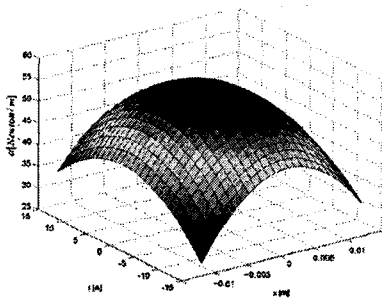
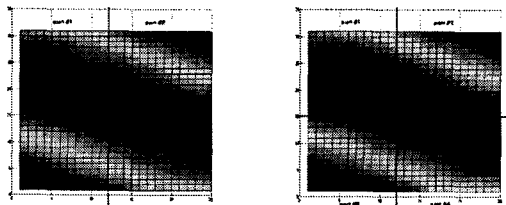
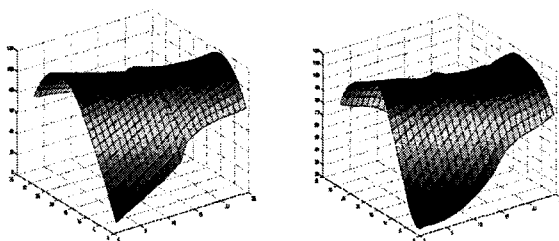


그림 8 근사화된 추정 파라미터 α 의 곡면도
Fig. 8 Plot of approximated identified parameter α



(a) 2구간으로 나눈 경우 (b) 4구간으로 나눈 경우

그림 9 \hat{L}_e 을 2, 4구간으로 나눈 경우
Fig. 9 \hat{L}_e which is divided into 2 or 4 sub-sections



(a) 2구간으로 나눈 경우 (b) 4구간으로 나눈 경우

그림 10 구간으로 나눠 근사화된 추정 인덕턴스 L
Fig. 10 Approximated identified inductance L in the case of being divided into 2 or 4 sub-sections

지금까지 리니어 모터의 매개변수 추정에 관한 여러 가지 방식을 제시하였다. 모두 5가지의 추정방식에 의해 구한 모터의 매개변수 추정치를 식 (4)에 넣어 스트로크를 추정할 경우에, 각각의 추정오차를 측정하였다. 이 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) $\hat{\alpha}$ 과 \hat{L}_e 을 상수로 설정하였을 경우 : 모터에 가해지는 전압과 전류에 따라 추정오차가 들쭉날쭉하지만 일정 모터 상수를 채용하였을 경우에는 5.83%의 평균 스트로크 추정오차를 발생하였다.

2) 식 (9)를 이용하여 추정한 추정치 (그림 5, 6)를 이용한 경우 : 1.56%의 평균 스트로크 추정오차를 발생하였다. 이처럼 오차는 줄었지만 1)의 경우처럼 일정 모터 상수를 채용한 경우와는 달리 추정된 추정치를 저장할 적지 않은 데이터 메모리(1Mbyte 정도)가 필요하다는 단점이 있었다.

3) 식 (10)을 이용하여 추정한 추정치 (그림 7, 8)를 이용한 경우 : 2.68%의 평균 스트로크 추정오차를 발생하였다. 오차는 2)의 경우보다 증가하였지만, 저장할 데이터는 식 (10)의 연산에 필요한 상수 $C_i, i = 0, 1, \dots, 5$ 로 6개 뿐이다. 또한, 식 (10)의 연산에 약간의 시간이 추가로 소요되었다.

4) 그림 10 (a)와 같이 2구간으로 나눠 추정한 추정치를 이용한 경우 : 2.53%의 평균 스트로크 추정오차를 발생하였다. 3)의 경우에 비해 약간 오차가 줄어드는 대신 저장할 데이터 수는 12개로 늘었다.

5) 그림 10 (b)와 같이 4구간으로 나눠 추정한 추정치를 이용한 경우 : 2.42%의 평균 스트로크 추정오차를 발생하였다. 4)의 경우에 비해 약간 오차가 줄었지만 저장할 데이터 수는 24개로 늘었다.

4. 결론

본 논문에서는 리니어 컴프레서를 위한 페루우프 센서리스 스트로크 제어시스템을 구성하였으며, 피스톤 위치를 정확히 알아내기 위해 모터 매개변수를 피스톤 위치와 모터 전류의 함수로 추정하였다. 이 매개변수 데이터는 ROM 테이블에 저장한 뒤 차 후 피스톤 위치를 정확히 알아내는데 사용되었다. 또한, 추정된 모터 매개변수의 데이터 크기를 줄이기 위해 2차원 곡면 함수로 근사화 하는 작업을 수행하였다. 오차를 줄이기 위한 방안으로 2, 혹은 4구간으로 나눠 2차원 곡면 함수로 근사화 하는 접근도 시도하였다. 실험을 통해 저장하는 데이터 양과 스트로크의 추정 오차 사이에 trade-off 관계를 확인하였고, 향후 데이터 크기를 줄이면서 추정오차가 커지지 않는 제어 방식에 대한 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다. 또한, 본 논문에서 제시하는 알고리즘을 채용할 경우에 리니어 컴프레서의 aging 에 따른

영향을 생각해 볼 수 있는데, 추정된 모터 파라미터 $\hat{\alpha}$ 이나 \hat{L}_e 가 모터의 마그네트가 감자가 되면 약간의 오차가 발생하겠지만 이는 거의 무시할 만한 크기로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Reuven Unger, "Linear compressors for non-CFC refrigeration," Proceedings International Appliance Technical Conference (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA), May 13-15, 1996

[2] Robert Redlich, Reuven Unger, Nicholas van der Walt, "Linear compressors : motor configuration, modulation and systems," Proceedings International Compressor Engineering Conference (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA), July 23-26, 1996.

[3] Reuven Unger, "Linear compressors for clean and specialty gases," Proceedings International Compressor Engineering Conference (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA), July 14-17, 1998.

[4] Reuven Unger, "Development and testing of a linear compressor sized for the european market," Proceedings International Appliance Technical Conference (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA), May 10-12, 1999.

[5] Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto, and Yoji Takeda, "Analyses for sensorless linear compressor using linear pulse motor," Proceedings Industry Applications Conference, pp. 2298-2304, Oct., 3-7, 1999.

[6] Yee-Pien Yang and Wei-Ting Chen, "Dual stroke and phase control and system identification of linear

compressor of a split-stirling cryocooler," Proceedings Decision and Control, pp. 5120-5124, Dec. 7-10, 1999.

[7] Gye-young Song, Hyeong-kook Lee, Jae-yoo Yoo, Jin-koo Park, and Young-ho Sung, "Development of the linear compressor for a household refrigerator," Proceedings Appliance Manufacturer Conference & Expo, September 11-13, 2000.

[8] 유재유, 이철용, 이재춘, 황민규, 김정철, "리니어 컴프레서용 LOA의 스트로크 센서 없는 제어 방법" 전력전자 학술대회 논문집, pp.650-656, 2001

[9] Cadman, R. V., "A Technique for the Design of Electrodynamical Oscillating Compressors," Ph.D.Thesis, Purdue Univ, 1967.

[10] 김규식, 김춘환, "유도 전동기의 매개변수 추정 및 동정," 전력전자학회논문지, 제6권 3호, pp.282-290, 2001

[11] 박규현, 김이훈, 원충연, 김규식, 최세완, 함년근, "TMS320F240을 이용한 PWM 인버터 유도전동기 추동 시스템의 전도노이즈 저감을 위한 스위칭 기법" 전력전자학회 논문지, 제8권 1호, pp.89-97, 2003

저 자 소 개



김 규 식 (金奎植)

1958년 8월 25일생
 1981년 서울대 공대 전자공학과 졸업 (학사), 1983년 동 대학원 제어계측공학과 졸업 (석사), 1990년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사), 1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임 연구원, 1993년~현재 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 교수, 2003년~2005년 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수 (Visiting Scholar)
 TEL : 02-2210-2536
 FAX : 02-2249-6802
 E-mail : gskim318@uos.ac.kr