

논문 2014-51-10-22

# 매개변수 추정기를 갖는 리니어 컴프레서의 위치센서리스 스트로크 제어기 구현

(Implementation of Position Sensorless Stroke Controller of Linear Compressors with Motor Parameter Identification)

김 광 호\*, 남 재 우\*, 김 규 식\*

(Kwang-Ho Kim, Jae-Woo Nam, and Gyu-Sik Kim<sup>©</sup>)

## 요 약

본 논문에서는 리니어 컴프레서 위치센서리스 스트로크 제어기의 성능 향상을 위해 모터 매개변수 추정 시스템을 구현하였다. 리니어 컴프레서가 적용된 냉장고나 에어컨의 냉각능력을 제어하기 위해서는 단위시간동안 피스톤의 움직인 거리, 즉 피스톤의 속도를 제어해야 하는데 이때 리니어 모터의 주파수나 스트로크를 조정함으로써 가능하다. 이때, 주파수를 고정하고 스트로크를 변화시키는 것이 일반적이다. 스트로크, 즉 피스톤의 행정거리를 정확하게 추정하는 것이 리니어 컴프레서의 동특성을 좌우하는데, 본 연구에서는 모터 매개변수를 추정하는 경우와 상수로 놓았을 경우에 대해 필요한 메모리 공간과 스트로크 오차에 대한 실험 결과를 통해 그 장단점을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, a motor parameter identification system has been implemented to improve the performance of the position sensorless stroke controller for linear compressors. In order to control the cooling capability of a refrigerator or an air conditioner in which linear compressors are applied, the piston speed should be controlled. The piston speed control can be obtained by adjusting the frequency or the stroke of linear motors. The dynamic performance of linear compressors depends on how accurately the stroke or the piston amplitude is estimated. The merits and demerits of Constant method and PIM (Parameter Identification Method) concerning the needed memory space and the stroke error are discussed and verified via some experimental studies.

**Keywords:** linear compressor, motor parameter identification, piston speed control, memory space, stroke error

## I. 서 론

\* 정회원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부  
(Dept. of Electrical and Computer Engineering,  
University of Seoul)

© Corresponding Author(E-mail: gskim318@uos.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0023587)

접수일자: 2014년05월20일, 수정일자: 2014년07월24일  
게재확정: 2014년09월26일

환경보호에 대한 인식이 날로 확대됨에 따라 에너지 소비에 대한 규제가 강화되고 있는 요즘, 가정에서 사용되는 전기제품 중 에너지 소비가 가장 큰 냉장고와 에어컨이 큰 이슈가 되고 있다. 이에 따라 압축기 제조업체에서는 효율을 높이기 위한 노력으로 기존 압축기를 대체할 새로운 메커니즘에 대해 연구가 활발히 진

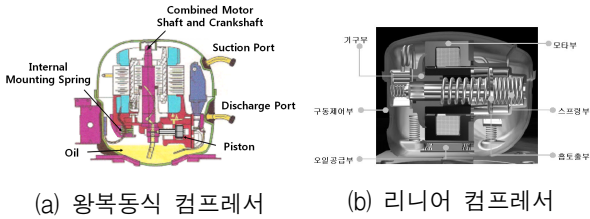


그림 1. 왕복동식 컴프레서와 리니어 컴프레서의 비교  
 Fig. 1. Comparison of reciprocating compressor and linear compressor.

행되어 왔다<sup>[1~7]</sup>. 이 중 리니어 컴프레서는 기존 왕복동식 컴프레서와는 완전히 다른 신개념의 컴프레서로서 기존 컴프레서의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 등장했다.

그림 1에서 보여주는 기존 왕복동식 컴프레서는 피스톤이 컨넥팅 로드나 크랭크핀에 의해 구속되어 일정한 스트로크(행정거리)를 실린더 내에서 왕복 운동하고 있는 반면에, 리니어 컴프레서의 피스톤은 어느 한 곳에 구속됨 없이 단지 공진 스프링에 의해 지지되어 있기 때문에 스트로크의 조절이 가능하다. 시스템상의 부하나 주위온도에 따라 스트로크 조절이 자유롭기 때문에 냉장고에 적용 시 소비전력 저감에 큰 효과를 나타낸다.

이처럼 리니어 컴프레서는 기존의 왕복동식에 비해 에너지 효율이 현격히 향상되어 레저용 소형 냉장고에서부터 가정용 냉장고, 그리고 에어컨에 이르기까지 그 응용범위를 넓혀 가고 있다<sup>[1]</sup>. 리니어 컴프레서에 적용 가능한 리니어모터의 구조와 관련한 문제를 다룬 논문<sup>[2]</sup>도 있었고 무빙 마그네트 타입과 무빙 코일타입의 리니어모터에 관한 연구와 리니어 컴프레서의 제어방식에 관한 폭넓은 연구가 제시되었다<sup>[3]</sup>. 유럽시장을 겨냥한 의료용이나 야외 휴대용 50Hz의 소형 리니어 컴프레서에 대한 연구도 있었다<sup>[4]</sup>. 피스톤 위치 제어와 위치센서리스 리니어 컴프레서의 효율에 관한 연구가 실험과 분석적 접근방식으로 제시되었고<sup>[5]</sup>, 680리터의 가정용 냉장고의 에너지 소비를 47%까지 절감할 수 있는 리니어 컴프레서의 개발에 관한 연구도 있었다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서는 리니어컴프레서의 동특성 향상을 위한 고성능 스트로크 제어기를 구현하였고, 본 연구의 실현 가능성을 보이기 위한 실험을 통해 그 유용함을 확인할 수 있었다.

## II. 본 론

### 2.1 리니어 컴프레서의 위치센서리스 스트로크 제어

리니어 모터의 전기회로 등가모델은 다음의 식 (1)처럼 선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다. 리니어모터의 추력  $F_e$  도 식 (2)처럼 선형식으로 표시할 수 있고 리니어 컴프레서 내에 있는 리니어 모터의 기계 방정식은 식 (3)처럼 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

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

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

$$M \frac{d^2x(t)}{dt^2} + C \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = \alpha i(t) - A_p \Delta P(t) \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 리니어 모터의 추력상수,  $L_e$ 는 유효인덕턴스,  $R_e$ 는 유효저항,  $v(t)$ 는 전원전압을,  $i(t)$ 는 권선에 흐르는 전류, 그리고  $\alpha \frac{dx(t)}{dt}$ 는 리니어 모터의 운동에 의해 권선에 발생하는 역기전력을 의미한다.  $M$ 은 피스톤과 무빙코일의 등가질량이며,  $C$ 는 점성댐핑 계수이고,  $K$ 는 스프링상수,  $A_p$ 는 피스톤의 단면적,  $x(t)$ 는 리니어 모터의 변위,  $\Delta P(t)$ 는 컴프레서 챔버와 피스톤 후면의 압력 차이이다. 라플라스 도메인상에서 표현된 리니어 모터의 기계계-전기계의 시스템 동적 모델링은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$X(s) = G(s)V(s) + W(s)\Delta P(s) \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{\alpha}{ML_e s^3 + (MR_e + CL_e)s^2 + (CR_e + \alpha^2 + L_e K)s + R_e K} \quad (5)$$

$$W(s) = \frac{(L_e s + R_e)A_p}{ML_e s^3 + (MR_e + CL_e)s^2 + (CR_e + \alpha^2 + L_e K)s + R_e K} \quad (6)$$

정확한 피스톤 위치를 측정하기 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 같은 위치추정 자기센서를 이용할 수 있지만 이러한 센서들은 가격이 비싸고 장착이 쉽지 않다. 따라서, 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 수 있는 효율적인 방법이 요구된다. 다음은 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 수 있는

방법을 보여준다. 식 (1)를  $x(t)$ 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{\alpha} \left( v(t) - L_e \frac{di(t)}{dt} - R_e i(t) \right) \quad (7)$$

식 (7)를 적분한 추정값  $\hat{x}(t)$  는 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= \int_0^t \left( \frac{dx}{d\tau} \right) d\tau \\ &= \frac{1}{\alpha} \int_0^t [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau - \frac{L_e}{\alpha} i(t) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 피스톤의 위치를 간접적으로 추정하고자 하는데 식 (8)은 아날로그 회로로 구현할 경우이고 디지털 방식으로 피스톤의 위치를 추정할 경우에는  $\hat{x}$ 의 n번째 값은 다음 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_n &= \frac{T}{\alpha} \sum_{k=1}^n \left( \frac{v(k-1) + v(k)}{2} \right) - \frac{TR_e}{\alpha} \sum_{k=1}^n \left( \frac{i(k-1) + i(k)}{2} \right) \\ &\quad - \frac{L_e}{\alpha} i(n), \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 T는 샘플링 주기이다. 식 (8), (9)와 같이 피스톤의 위치를 피스톤 위치 측정센서 대신 전압센서와 전류센서를 이용하여 간접적으로 추정하여 스트로크를 제어하는 방식을 위치센서리스 스트로크 제어라 부른다<sup>[5, 10]</sup>. 이는 엔코더를 이용하여 속도를 측정하는 대신 전압센서와 전류센서로 전동기의 속도를 추정하는 방식을 센서리스 전동기 속도제어라 부르는 것과 같다. 한편, 90° 위상지연 필터를  $H_d(s)$  라 하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$H_d(s) = \frac{2\pi f - 2s}{2\pi f + 2s} \quad (10)$$

여기서,  $f$ 는 피스톤의 동작 주파수이다.  $\hat{x}_d(t)$  를  $\hat{x}(t)$ 의 90° 위상지연된 신호라고 한다면, 스트로크 추정치  $\hat{z}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{z}(t) = 2 \sqrt{\hat{x}^2(t) + \hat{x}_d^2(t)} \quad (11)$$

식 (8)에서 모터 매개변수는 일정한 상수가 아니기 때문에 일정한 상수라고 가정하고 식 (8)에서 피스톤의 위치를 추정한다면 추정오차가 커져 시스템의 피스톤 위치 제어성능에 영향을 적지 않게 미친다. 따라서, 가

장 영향을 미치는  $\alpha$  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)으로부터 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\hat{\alpha} x(t) + \hat{L}_e i(t) = \int_0^t [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \quad (12)$$

식 (12)에 있는  $x(t)$ ,  $i(t)$ ,  $v(t)$ 는 각각 LVDT 와 같은 위치센서, 전류센서, 전압센서를 이용하여 직접 측정한다.  $\hat{\alpha}$  와  $\hat{L}_e$  은 각각  $\alpha$  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.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} x(t_1) + \hat{L}_e i(t_1) &= \int_0^{t_1} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \hat{\alpha} x(t_2) + \hat{L}_e i(t_2) &= \int_0^{t_2} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ &\vdots \\ \hat{\alpha} x(t_n) + \hat{L}_e i(t_n) &= \int_0^{t_n} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 정리하면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{L}_e \end{bmatrix} = b \quad (14)$$

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

$$A = \begin{bmatrix} x(t_1) & i(t_1) \\ x(t_2) & i(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ x(t_n) & i(t_n) \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \int_0^{t_1} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \int_0^{t_2} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \vdots \\ \int_0^{t_n} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \end{bmatrix} \quad (15)$$

pseudo inverse를 이용하여 식 (15)는 다음 식 (16)과 같이 정리될 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{L}_e \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (16)$$

그럼 2에는 위치센서리스 스트로크 제어를 구현하

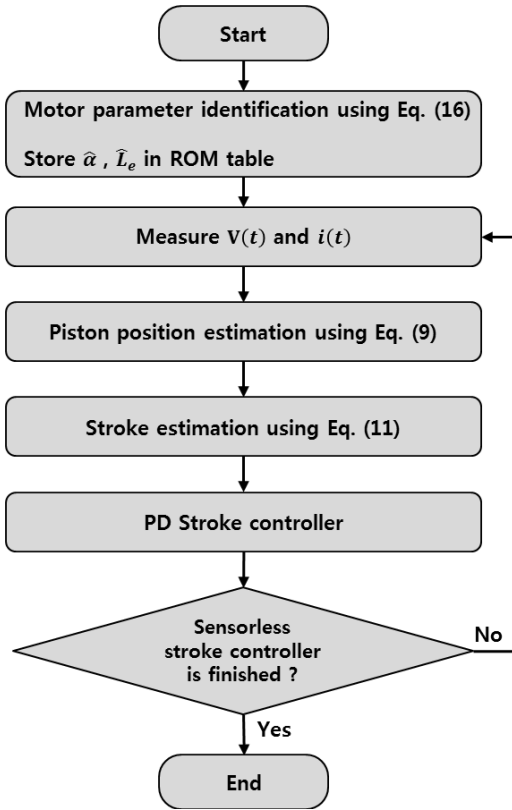


그림 2. 위치센서리스 스트로크 제어기의 플로우차트  
Fig. 2. Flow chart of position sensorless stroke controller.

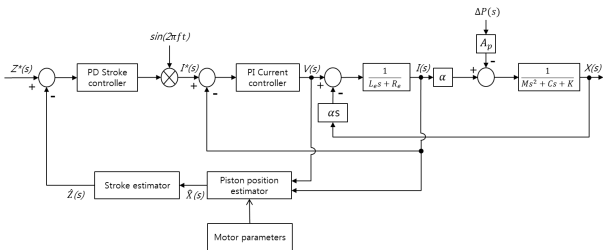
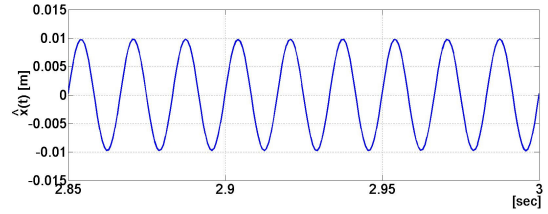
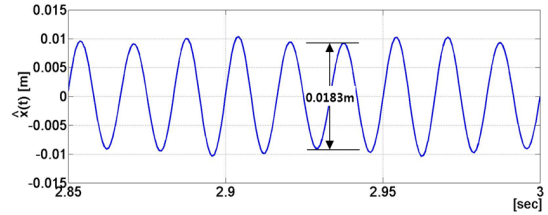


그림 3. 위치센서리스 스트로크 제어기의 블록선도  
Fig. 3. Block diagram of sensorless stroke controller.

기 위한 플로우 차트를 보여주고 있다. 위치센서리스 스트로크 제어 루우프를 반복적으로 실행하기 앞서, 식 (16)을 이용하여 모터 매개변수  $\hat{\alpha}$  와  $\hat{L}_e$ 를 추정하고 이를 ROM 테이블에 저장한다. 측정된  $v(t)$ ,  $i(t)$ 와 식 (9)를 이용하여 피스톤 위치의 추정값  $\hat{x}(t)$ 를 구하고 식 (11)을 이용하여 스트로크를 추정한다. PD 제어기를 이용하여 스트로크를 제어하고 다시  $v(t)$ ,  $i(t)$ 를 측정하는 반복적인 위치센서리스 스트로크 제어 루우프를 실행한다. 한편, 리니어 컴프레서의 전기기계 방정식의 모델링과 전류제어기, 스트로크 제어기, 피스톤 위치 추



(a) 위치센서가 있는 경우



(b) 위치센서리스 제어의 경우

그림 4. 위치센서리스 제어의 성능 평가  
Fig. 4. Performance evaluation of position sensorless control.

정기, 그리고 스트로크 추정기를 포함한 위치센서리스 스트로크 제어기의 블록선도를 그림 3에 보여준다. 그림 3에서 알 수 있듯이 PI 전류제어기를 이용하여 리니어 모터의 동적성능을 향상시키고, 추정되어 ROM 테이블에 저장된 모터 매개변수들을 이용하여 피스톤 위치의 추정값  $\hat{X}(s)$ 를 구한 뒤 스트로크 추정기에 의해  $\hat{Z}(s)$ 를 얻는다.

### 2.3 실험에 의한 성능 평가

리니어 컴프레서를 위한 위치센서리스 스트로크 제어기의 실험장치가 그림 5와 같이 구성되었다. 그림 5에서 제어기 보드에는 인버터와 위치센서리스 제어 알

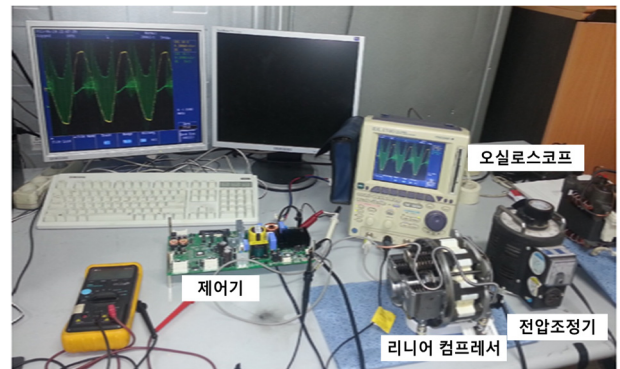


그림 5. 위치센서리스 스트로크 제어기의 실험장치  
Fig. 5. Experimental apparatus of position sensorless stroke controller.

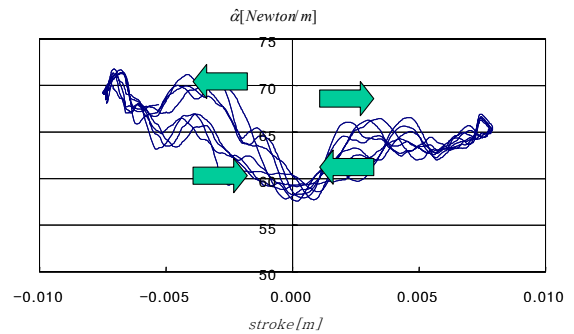
표 1. 리니어 모터 사양과 제어기 이득  
Table 1. Linear motor specifications and controller gains.

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| 정격 출력 파워        | 2.2 kW        |
| 정격 입력 전압        | 220 Vrms      |
| 정격 전류           | 7 Arms        |
| 정격 스트로크         | 0.02 m        |
| 전압 주파수          | 60 Hz         |
| 유효 저항 $R_e$     | 2.5 $\Omega$  |
| 추력 상수 $\alpha$  | 65 Newton/Amp |
| 유효 인덕턴스 $L_e$   | 0.11 H        |
| 피스톤 질량 $M$      | 0.186 kg      |
| 점성댐핑계수 $C$      | 5 Ns/m        |
| 스프링 상수 $K$      | 62,500 N/m    |
| $k_{ps}$ (스트로크) | 480           |
| $k_{Ds}$ (스트로크) | 8.5           |
| $k_{pI}$ (전류)   | 5.7           |
| $k_{II}$ (전류)   | 11.5          |

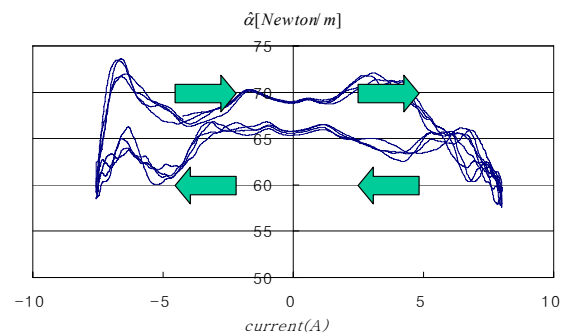
고리증이 구현되어 있고 채용된 CPU는 TMS320C2000이다. 전압조정기는 리니어컴프레서에 가해 줄 교류전압을 공급해 주고 오실로스코프는 파형관측용이다. 한편, 실험에 사용된 리니어 모터의 사양과 PD 스트로크 및 PI 전류제어기에서 사용된 제어기 이득은 표 1에 있다. 식 (16)을 이용하여 오프라인 실험을 통해 추정된 모터 매개변수  $\hat{\alpha}$  와  $\hat{L}_e$ 가 각각 그림 6, 그림 7에 보여 준다.

그림 6에서 알 수 있듯이, 추정된 모터 매개변수  $\hat{\alpha}$ 는 일정한 상수가 아니라 스트로크나 전류에 따라 크게 변한다. 또한, 그림 7과 같이 추정된 모터 매개변수  $\hat{L}_e$ 도 스트로크나 전류에 따라 크게 변한다. 식 (16)을 이용하여 모터 매개변수  $\hat{\alpha}$ 와  $\hat{L}_e$ 를 추정하고 이를 ROM 테이블에 저장한 뒤, 식 (8)의 피스톤 위치를 추정할 때 이 값 들을 이용하는 방법을 PIM 이라 하고  $\alpha$ 와  $L_e$ 를 일정하게 놓고 피스톤 위치를 추정하는 방법을 Constant 라고 하면, PIM의 경우는 추정된 매개변수를 ROM 테이블에 저장하는데 필요한 메모리 크기는 6,200바이트이고 Constant의 경우는 8바이트에 불과하다.

두 번째로, 스트로크 제어오차를 비교한다. 그림 3의 페루우프 센서리스 스트로크 제어시스템에서, 스트로크



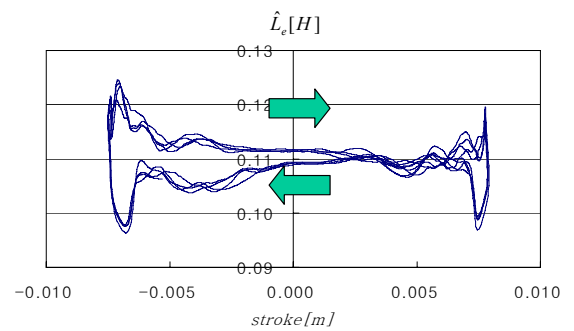
(a) 스트로크의 함수로 추정된  $\hat{\alpha}$



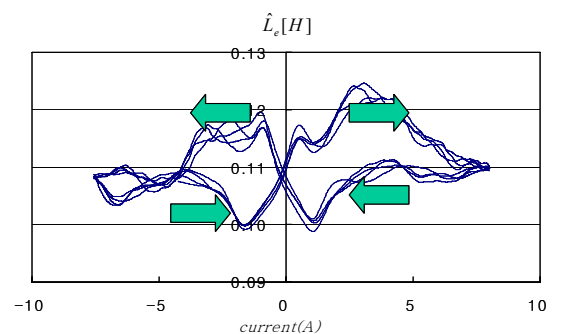
(b) 전류의 함수로 추정된  $\hat{\alpha}$

그림 6.  $\hat{\alpha}$ 의 추정 결과

Fig. 6. Identification result of  $\hat{\alpha}$ .



(a) 스트로크의 함수로 추정된  $\hat{L}_e$



(b) 전류의 함수로 추정된  $\hat{L}_e$

그림 7.  $\hat{L}_e$ 의 추정 결과

Fig. 7. Identification result of  $\hat{L}_e$ .

표 2. 매개변수 추정방식에 따른 스트로크 오차  
Table 2. Stroke errors for various parameter identification methods.

| 스트로크 오차(%)<br>$Z^*$ (m) | Constant 방식 | PIM 방식 |
|-------------------------|-------------|--------|
| 0.0110                  | 5.2         | 1.7    |
| 0.0115                  | 4.9         | 1.4    |
| 0.0120                  | 5.1         | 1.5    |
| 0.0125                  | 5.3         | 1.6    |
| 0.0130                  | 5.3         | 1.9    |
| 0.0135                  | 5.6         | 1.6    |
| 0.0140                  | 5.9         | 1.5    |
| 0.0145                  | 5.9         | 1.8    |
| 0.0150                  | 6.2         | 1.6    |
| 0.0155                  | 5.9         | 1.5    |
| 0.0160                  | 6.6         | 1.9    |
| 0.0165                  | 7.1         | 1.6    |
| 0.0170                  | 7.2         | 1.8    |
| 0.0175                  | 7.6         | 1.8    |
| 0.0180                  | 8           | 1.9    |
| 0.0185                  | 7.9         | 2.1    |
| 0.0190                  | 8.5         | 2.3    |
| 평균                      | 6.36        | 1.74   |

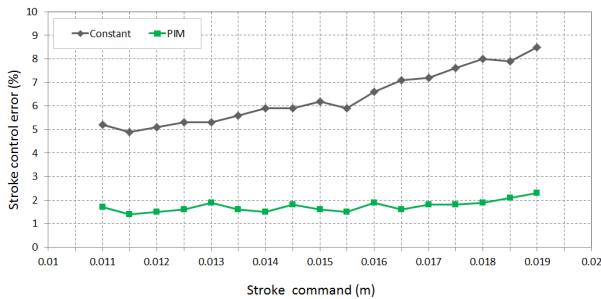


그림 8. 스트로크 제어 오차

Fig. 8. Stroke control error.

명령치를 0.011m 로 설정한다. 정상상태에서 Constant 방식의 경우는 위치센서가 있는 경우를 기준으로 5.2%의 스트로크 오차를 보이지만 PIM 방식은 1.7%의 스트로크 오차를 나타낸다. 스트로크 명령치를 0.011m에서 0.019m까지 0.0005m씩 증가시키면서 같은 실험을 한 결과가 표 2에 보여준다. 이 실험에서 Constant 방식의 경우는 6.36%의 평균 스트로크 오차를 보이지만 PIM 방식은 1.74%의 평균 스트로크 오차를 나타낸다.

표 2의 실험결과를 스트로크 명령치에 따른 오차의 경향을 도식적으로 표현하기 위해 그래프로 나타낸 것이 그림 8에 있다. 그림 8에서 일 수 있듯이, PIM 방식 보다 Constant 방식의 스트로크 제어 오차가 두세배 크

고 특히, 스트로크 명령치가 클수록 제어오차가 더 벌어짐을 알 수 있다. 이는 그림 6(a)나 그림 7(a)에서 스트로크가 커질수록 매개변수의 변화도 큰데 이를 상수로 놓음으로써 큰 오차를 유발한다고 판단된다.

### III. 결 론

회전운동을 직선운동으로 바꿀 필요가 없는 리니어 컴프레서는 기존의 왕복동식에 비해 에너지 효율이 현격히 향상되어 레저용 소형 냉장고에서부터 가정용 냉장고, 그리고 에어컨에 이르기까지 그 응용범위를 넓혀가고 있다. 본 논문에서는 리니어 컴프레서를 위한 위치센서리스 스트로크 제어 시스템을 구현함에 있어, 모터 매개변수를 추정하여 ROM 테이블에 저장하여 스트로크 추정시 이를 이용하는 경우에는 비록 부가적인 메모리 공간이 필요하지만 스트로크 오차가 줄어들고, 반면에 모터 매개변수를 상수로 놓고 스트로크를 추정하는 경우에는 메모리 공간은 거의 필요치 않지만 스트로크 오차가 꽤 커지는 단점이 있다. 따라서, 6,200바이트에 해당하는 추가적인 메모리 공간이 제공된다면 전류와 스트로크의 함수로 나타나는 리니어 모터의 추력상수와 유효인덕턴스를 미리 ROM 테이블에 저장하고 이를 이용하여 스트로크를 추정함으로써 위치센서리스 스트로크 제어기의 더 정밀한 제어성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

### REFERENCES

- [1] Reuven Unger, "Linear compressors for non - CFC refrigeration," *Proceedings International Appliance Technical Conference*, pp.373-380, May, 1996.
- [2] Robert Redlich, Reuven Unger, Nicholas van der Walt, "Linear compressors : motor configuration, modulation and systems," *Proceedings International Compressor Engineering Conference*, pp.68-74, July, 1996.
- [3] Reuven Unger, "Linear compressors for clean and specialty gases," *Proceedings International Compressor Engineering Conference*, pp.73-78, July, 1998.
- [4] Reuven Unger, "Development and testing of a linear compressor sized for the european market," *Proceedings International Appliance*



- Technical Conference*, pp.74 - 79, May, 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., 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., 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*, pp.31-38, Sept., 2000.
- [8] B. J. Huang, "System dynamics and control of a linear compressor for stroke and frequency adjustment," *Transactions of the ASME*, Vol.124, pp.176 - 182, 2002.
- [9] J. Zhang, Y. Chang, and Z. Xing, "Study on self-sensor of linear moving magnet compressor's piston stroke," *IEEE Sensors Journal*, Vol.9, No.2, pp.154-158, Feb., 2009.
- [10] Tae-Won Chun, Jung-Ryol Ahn, "A Novel Strategy of Efficiency Control for a Linear Compressor System Driven by a PWM Inverter," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol 55, No 1, pp.296-301, 2008.
- [11] Zhengyu Lin, Jiabin Wang, "A Learning Feed-Forward Current Controller for Linear Reciprocating Vapor Compressors," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol 58, No 8, 2011.
- [12] Jae-Wu Nam, Joon-Tae Oh, Gyu-Sik Kim, "Parameter Identification and Error Analysis of Approximation method for Linear motors," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol 49-SC, No 4, pp.61-68, 2012.
- [13] Joon-Tae Oh, Gyu-Sik Kim, "A Study of the Dynamic Performance Improvement of a Linear Compressor Stroke Controller with a Current Control Loop," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol 50-SC, No 8, pp.2202-2210, 2013.

— 저 자 소 개 —



김 광 호(정회원)  
2009년 연세 대학원 전기공학과 석사 졸업.  
2014년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 박사과정.  
1995년~2014년 kt 융합기술원 미래개발그룹

<주관심분야 : 센서네트워크, 제어, 에너지 변환>



남 재 우(정회원)  
1992년 수원대학교 전기공학과 학사 졸업.  
2009년 연세 대학원 전기공학과 석사 졸업.  
2014년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 박사과정.

<주관심분야 : 센서네트워크, 제어, 에너지 변환>



김 규 식(정회원)  
1981년 서울대학교 전자공학과 졸업  
1983년 서울대학교 제어계측 공학과 석사 졸업  
1990년 서울대학교 제어계측 공학과 박사 졸업

1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임 연구원  
1993년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수  
2003년~2005년 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수(Visiting Scholar)  
<주관심분야 : 센서네트워크, 비선형제어, 에너지 변환>