

논문 2014-51-3-17

리니어 컴프레서의 위상제어를 통한 동특성 향상에 관한 연구

(A Study of Dynamic Performance Improvement of Linear Compressors Using Phase Control Loop)

남재우*, 오준태*, 김규식*

(Jae-Woo Nam, Joon-Tae Oh, and Gyu-Sik Kim[©])

요약

본 논문에서는 리니어 컴프레서의 스트로크 동특성 향상을 위해 위상 제어 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 위상제어 시스템을 스트로크 제어 루우프에 추가로 삽입함으로써 스트로크 동특성이 향상됨을 모의실험을 통해 확인하였다.

Abstract

In this paper, a phase control system has been implemented to improve the dynamic performance of the stroke response 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. A phase control system is added to the stroke control loop and the superior performance of the phase control system is verified via some simulation studies.

Keywords : linear compressor, linear motor, stroke, piston amplitude, phase control system

I. 서론

일반 가정에서 냉장고의 전력소비는 전체 가정에서 소비하는 전력의 약 1/3가량을 차지하고 있으며 냉매를 순환시키고 열 교환을 수행키 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 직선운동 방향으로 가해지기 때문에 피스톤에 의해 측면방향의 미는 힘이 발생하지 않는다. 이에 따라, 기존의 왕복동식 컴프레서에 비해 마찰손실이 작고 운전 중에 소음이 작다^[1].

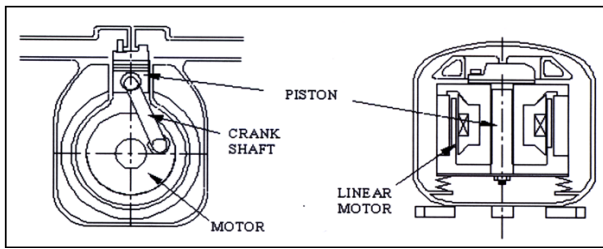
또한, 왕복동식 컴프레서의 경우 단상유도전동기를 사용시 정속운전이 가능하며 모터효율이 90%이하인 반

* 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: 2014년1월2일, 수정완료일: 2014년2월26일



(a) 왕복동식 컴프레서 (b) 리니어 컴프레서

그림 1. 왕복동식 컴프레서와 리니어 컴프레서
Fig. 1. Reciprocating compressor and linear compressor.

면, 리니어 컴프레서의 경우에는 스트로크 가변제어로 냉동능력의 조절이 가능하며 리니어모터의 효율이 90~95%에 이른다. 이처럼 리니어 컴프레서는 기존의 왕복동식에 비해 에너지 효율이 현격히 향상되어 레저용 소형 냉장고에서부터 가정용 냉장고, 그리고 에어컨에 이르기까지 그 응용범위를 넓혀 가고 있다^[7,8]. 리니어 컴프레서에 적용 가능한 리니어모터의 구조와 관련한 문제를 다룬 논문^[2]도 있었고 무빙 마그네트 타입과 무빙 코일타입의 리니어모터에 관한 연구와 리니어 컴프레서의 제어방식에 관한 폭넓은 연구가 제시되었다^[3]. 유럽 시장을 겨냥한 의료용이나 야외 휴대용 50Hz의 소형 리니어 컴프레서에 대한 연구도 있었다^[4].

피스톤 위치 제어와 센서리스 리니어 컴프레서의 효율에 관한 연구가 실험과 분석적 접근방식으로 제시되었고^[5], 680리터의 가정용 냉장고의 에너지 소비를 47%까지 절감할 수 있는 리니어 컴프레서의 개발에 관한 연구도 있었다^[7]. 왕복동식 모터와 리니어 모터의 동작 원리는 그림 2에 있고 냉장고용 리니어컴프레서의 단면도가 그림 3에 있다. 코일에 흐르는 교류 전류에 의한 교번 자기장과 미그네트에 의한 자기장에 의하여 마그네트를 진동하는 힘이 발생하고 이 진동력이 마그네트



(a) 왕복동식 모터 (b) 리니어 모터

그림 2. 왕복동식 모터와 리니어 모터의 동작원리
Fig. 2. Motion comparison of reciprocating motor and linear motor.

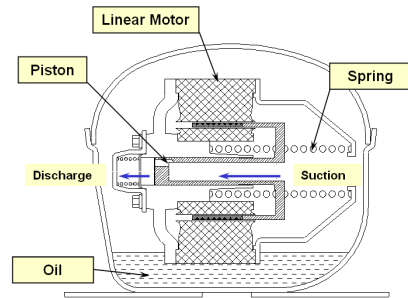


그림 3. 냉장고용 리니어컴프레서의 단면도
Fig. 3. A cross-section view of a linear compressor for refrigerators.

에 연결된 피스톤을 진동시키면 피스톤 질량과 스프링으로 구성된 진동 시스템의 공진이 발생한다. 이 공진에 의하여 진동하는 진폭이 커져서 피스톤의 진동이 주기적으로 냉매를 압축/팽창 시키고 흡입/토출 밸브에 의해 압축된 냉매가 토출 파이프를 통하여 컴프레서 외부로 토출된다. 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.

본 논문에서는 리니어컴프레서를 위한 스트로크 위상 제어기를 설계하고 본 연구의 실현 가능성을 보이기 위해 몇가지 모의실험을 수행하였고 외부 외란에 강인함을 확인할 수 있었다.

II. 본 론

2.1 리니어 컴프레서의 수학적 모델링

리니어 컴프레서 내에 있는 리니어 모터의 기계 방정식은 식 (1)처럼 나타낼 수 있다.

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + C \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = \alpha i(t) - A_p \Delta P(t) \quad (1)$$

여기서 M 은 피스톤과 무빙코일의 등가질량이며, C 는 점성댐핑계수이고, K 는 스프링상수, α 는 리니어 모터의 추력상수, A_p 는 피스톤의 단면적, $x(t)$ 는 리니어 모터의

변위, $i(t)$ 는 권선에 흐르는 전류, $\Delta P(t)$ 는 컴프레서 챔버와 피스톤 후면의 압력 차이이다.

한편, 리니어 모터의 전기회로 등가모델은 다음의 식 (2)처럼 선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다. 리니어 모터의 추력 F_e 도 식 (3)처럼 선형식으로 표시할 수 있다.

$$\alpha \frac{dx(t)}{dt} + L_e \frac{di(t)}{dt} + R_e i(t) = v(t) \quad (2)$$

$$F_e(t) = \alpha i(t) \quad (3)$$

식 (2)에서 L_e 는 유효인덕턴스, R_e 는 유효저항, $v(t)$ 는 전원전압을, 그리고 $\alpha \frac{dx(t)}{dt}$ 는 리니어 모터의 운동에 의해 권선에 발생하는 역기전력을 의미한다. 라플라스 도메인상에서 표현된 리니어 모터의 기계계-전기계의 블록선도는 그림 4와 같다.

그림 4에서 리니어 모터의 시스템 동적 모델링은 다음과 같다.

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

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

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

리니어 컴프레서에서는 기구적으로 구속되어 있지

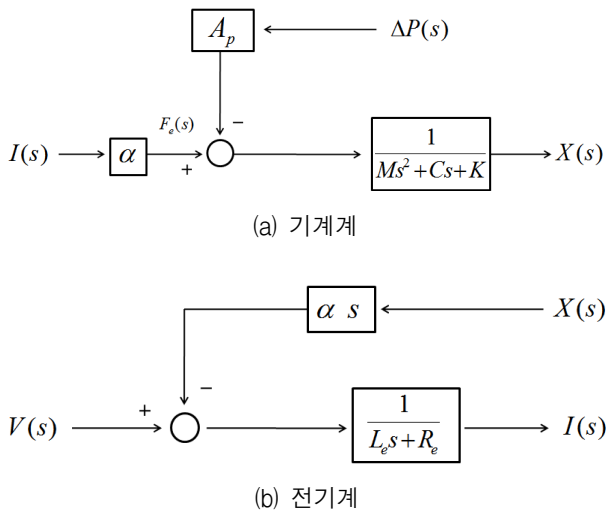


그림 4. 리니어 모터의 동적 시스템 블록선도
Fig. 4. Block diagram of linear motor dynamic system.

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. 다음은 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 수 있는 한 가지 방법을 보여준다. 식 (2)를 $x(t)$ 에 대해 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 피스톤 위치의 추정값 $\hat{x}(t)$ 는 다음과 같다.

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

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

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

$n=1,2,3, \dots$

여기서 T는 샘플링주기이다.

2.2 피스톤 진폭 추정기의 구현

기존 왕복동식은 피스톤이 크랭크 샤프트에 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. 그래서 시스템상의 부하나 주위온도에 따라 스트로크 조절이 자유롭기 때문에 냉장고에 적용시 소비전력 저감에 큰 효과를 나타낸다. 리니어 컴프레서가 적용된 냉장고나 에어컨의 냉각능력을 제어하기 위해서는 단위시간동안 피스톤의 움직인 거리, 즉 피스톤의 속도를 제어해

야 하는데 이때 리니어 모터의 주파수나 스트로크를 조정함으로써 가능하다. 이때, 주파수를 고정(예를 들어 60Hz)하고 스트로크를 변화시키는 것이 일반적이다. 만일 리니어 모터의 피스톤 위치가 식 (10)처럼 표현된다면 스트로크는 $2X_m$ 이 된다. 따라서, 스트로크를 제어하려면 X_m 의 크기를 제어하는 것과 마찬가지로 이를 위해 식 (10)의 피스톤 위치 파형으로부터 X_m 을 추정해야 함을 의미한다.

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (10)$$

피스톤 진폭을 추정하는 방식으로 위상지연 필터를 이용하는 방안을 살펴본다. θ [rad] 위상지연필터는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$H_d(s) = \frac{120\pi - \beta s}{120\pi + \beta s} \quad (11)$$

여기서 $\beta = 1$ 이면 다음 식이 성립한다.

$$|H_d(j\omega)| = 1 \quad (12)$$

$$\angle H_d(j\omega) = -\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = -\frac{\pi}{2} [rad] \quad (13)$$

즉, $\beta = 1$ 이면 식 (11)은 90° ($\frac{\pi}{2}$ 라디안) 위상지연 필터 기능을 한다. 식 (10)의 $x(t)$ 가 90° 위상지연 필터를 통과한 것을 $x_d(t)$ 라 하면,

$$x_d(t) = X_m \sin(\omega t + \phi) \quad (14)$$

따라서, 다음의 피스톤 진폭 추정식을 얻을 수 있다.

$$\widehat{X}_m(t) = \sqrt{x^2(t) + x_d^2(t)} \quad (15)$$

2.3 피스톤 위상 제어기의 구현

전류의 위상과 스트로크의 위상을 추정하기 위해서는 식 (11)의 위상 지연 필터를 이용하여 식 (16), (17)과 같이 전류 및 스트로크 위상 추정기를 구현한다.

$$\widehat{\theta}_i = \tan^{-1}\left(\frac{i_d}{i}\right) \quad (16)$$

$$\widehat{\theta}_s = \tan^{-1}\left(\frac{x_d}{x}\right) \quad (17)$$

여기서, $\widehat{\theta}_i$ 는 전류의 위상 추정치를 나타내고, i_d 는 위상 지연 필터를 이용하여 위상을 90° 지연된 전류 값을 나타낸다. $\widehat{\theta}_s$ 는 스트로크의 위상 추정치를 나타내고, x_d 는 위상 지연 필터를 이용하여 위상이 90° 지연된 추정된 스트로크 값을 나타낸다. 전류의 위상과 스트로크의 위상차는 180° 이내에서 변화하므로 제 2상항에 존재하게 된다. 그러므로 sin함수를 이용해서 전류의 위상에서 스트로크를 빼준 위상차는 부(-)의 값을 갖게 되고 식 (18)을 이용하여 위상차를 변환하여 표시 할 수 있다.

$$\sin(\widehat{\theta}_i - \widehat{\theta}_s) = \sin(-\phi) = -\sin(\phi) \quad (18)$$

여기서, ϕ 는 전류의 위상과 스트로크의 위상의 차를 나타낸다. 위상 제어기는 식(18)에서 구한 위상차의 변환치 값에 비례 계수 k_{ph} 값을 곱하여 구현한다.

2.4 모의실험에 의한 성능 평가

리니어 모터의 스트로크 위상제어 알고리즘의 성능 평가를 위해 그림 5와 같은 제어 시스템을 구현하였다. 스트로크 제어기에 사용된 비례계수는 $k_{ps} = 52$ 이고, 적분계수는 $k_{is} = 57.3$ 이다. 전류 제어기에 사용된 비례계수는 $k_{pi} = 13.1$ 이고, 적분계수는 $k_{ii} = 18.5$ 이다. $M = 0.186\text{kg}$, $C = 5[\text{Ns/m}]$, $K = 62,500[\text{N/m}]$, $\alpha = 60[\text{Vs/ml}]$, $L_e = 0.11[\text{H}]$, $R_e = 3.4[\Omega]$ 의 매개변수를 갖는 선형 압축기에 대해 $t=0$ 에서 $X_m^*(s) = 0.01\text{m}$ 를 스텝 입력하고, $t = 0.5\text{sec}$ 에서 외란입력 $D(s) = 25\text{V}$ 를 스텝 입력하기로 한다.

또한, $t = 1\text{sec}$ 에서 $X_m^*(s) = 0.03\text{m}$ 로 변경하고, $t = 1.5\text{sec}$ 에서 외란입력을 $D(s) = -25\text{V}$ 로 스텝 변경하였고, $t = 2\text{sec}$ 에서 $X_m^*(s) = 0.02\text{m}$ 로 변경하였을 때의 모의 실험을 수행하였다. 그 결과가 그림 6, 그림 7, 그림 8에 각각 있다. 그림 6(a)는 전류의 위상을, 그림 6(b)는 스트로크의 위상을 각각 나타내고 있다. 그림 6(c)는 전류의 위상에서 스트로크의 위상을 뺀 위상차를 나타내며 그림 6(d), (e)는 그림 6(c)를 일부 확대한 그림이다.

그림 7(a)는 위상제어기의 출력을 나타내고 있다. 초기 0.03sec 까지는 비교적 큰 출력을 나타내고 있고, 0.5sec 에서 부극성의 외란을 인가하였을 경우 제어기의 출력을 증가시켜 명령치를 추종하고 있다. 또한, 1sec 에서 명령치를 0.01m 에서 0.03m 로 변경하였을 때,

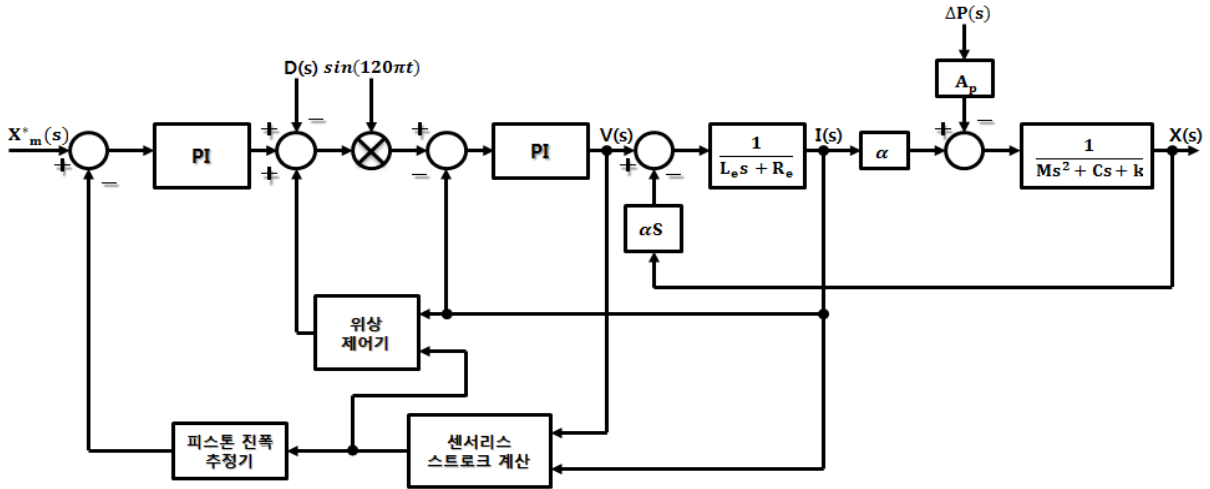
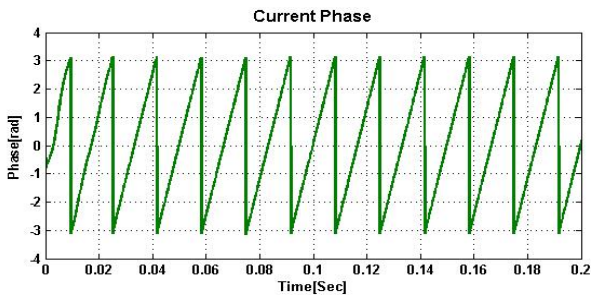
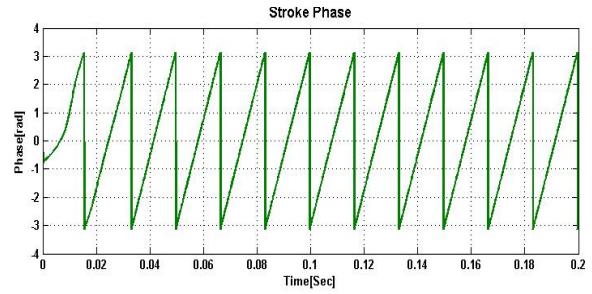


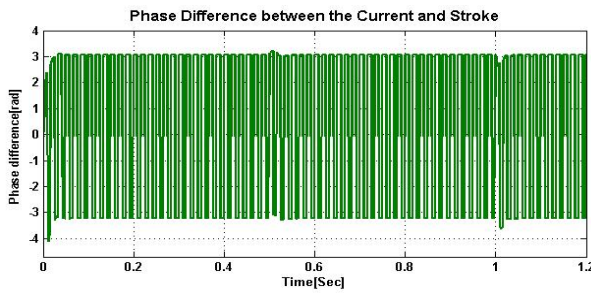
그림 5. 리니어 모터의 스트로크 위상제어 시스템 블록선도
 Fig. 5. Block diagram of linear motor stroke phase control system.



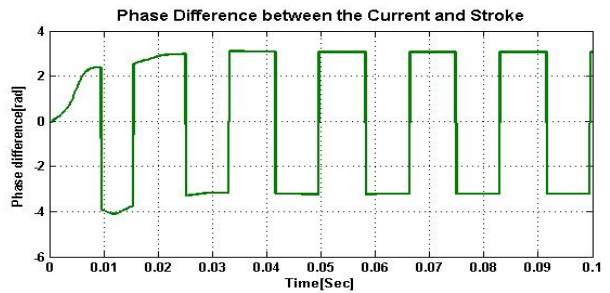
(a) 전류의 위상



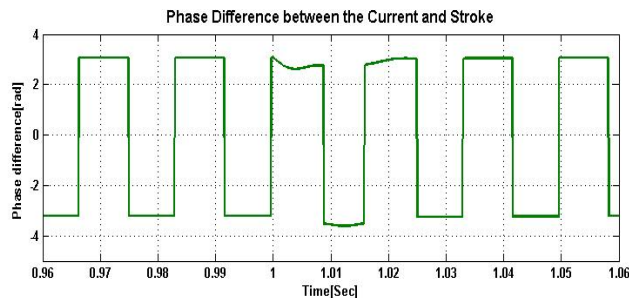
(b) 스트로크의 위상



(c) 전류와 스트로크의 위상차

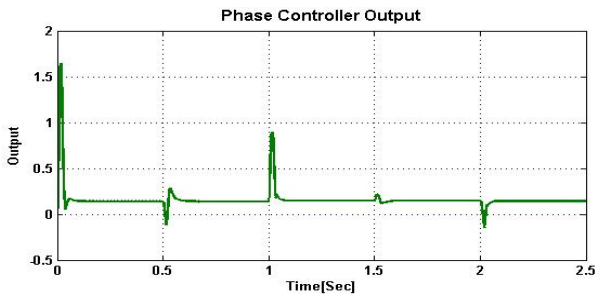


(d) 전류와 스트로크의 위상차 확대(1)

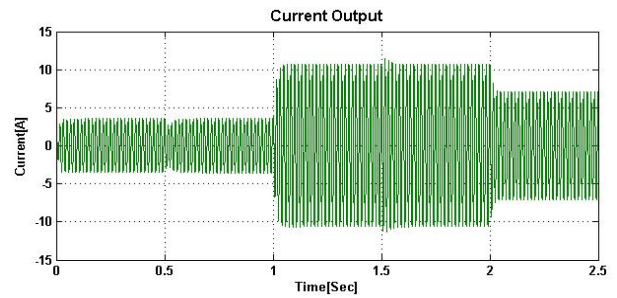


(e) 전류와 스트로크의 위상차 확대(2)

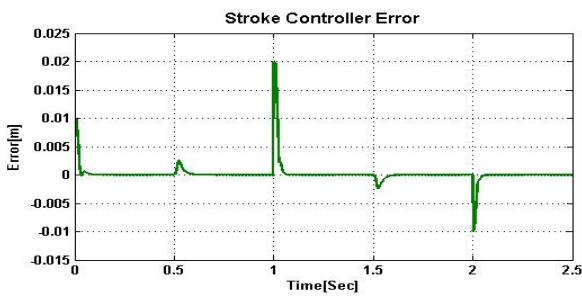
그림 6. 전류와 스트로크의 위상과 위상차
 Fig. 6. Phases and phase differences of current and stroke.



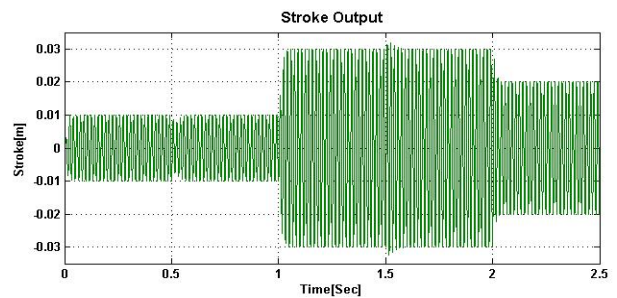
(a) 위상 제어기의 출력



(a) 전류 파형



(b) 스트로크 제어기의 오차



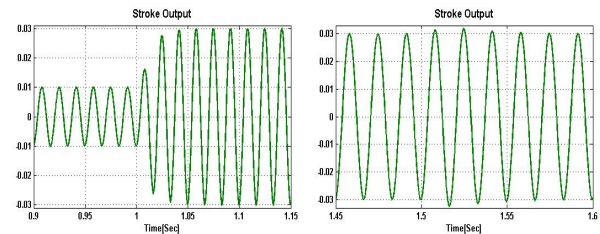
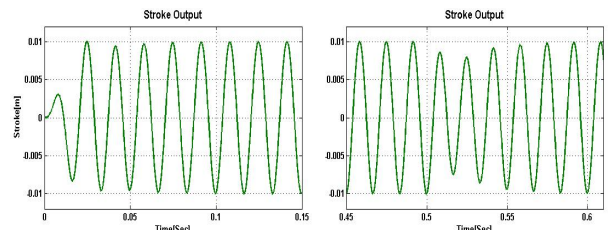
(b) 스트로크의 출력 파형

그림 7. 위상제어기의 출력과 스트로크 제어기의 오차
Fig. 7. Output of phase controller and error of stroke controller.

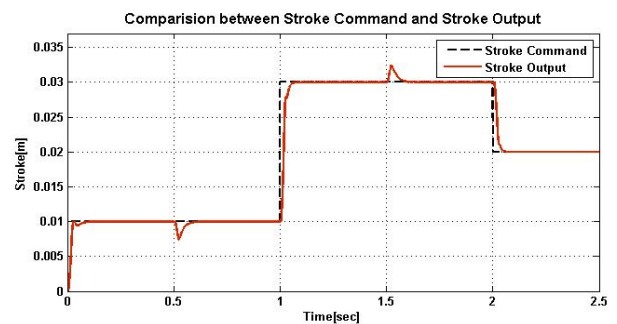
명령치를 추종할 수 있도록 위상제어기의 출력을 증가시키고 있다. 1.5sec 에서 정극성의 외란을 인가하였을 경우에 출력의 흔들림이 발생하고 2sec 에 0.03m에서 0.02m로 명령치를 변경하였을 경우 위상제어기의 출력이 감소됨을 볼 수 있다. 한편, 그림 7(b)는 스트로크 제어기의 오차를 나타낸다. 외란이나 명령치의 스텝변경에 대해 빠른 시간안에 스트로크 제어기의 오차는 회복하여 0으로 복귀함을 확인할 수 있었고 정상상태 오차는 거의 존재하지 않음을 볼 수 있었다.

그림 8(a)는 그림 5의 위상제어시스템에 대한 전류 파형을 보여준다. 그림 8(b)는 스트로크 출력 파형을 나타낸다. 그림 8(c)는 각각 시작부근, 부극성의 외란 인가 시점, 1sec에서 명령치를 스텝변경시점, 1.5sec에서 정극성의 외란을 인가 시점에서의 스트로크 출력 파형을 확대하여 나타내었다.

그림 8(d)는 스트로크 진폭 명령치와 실제 스트로크의 진폭 추정치의 응답 특성을 나타낸다. 그림 8(d)에서 볼 수 있듯이 시작 후 약 0.03sec만에 정상상태에 도달하고 있음을 알 수 있다. 0.5sec에서 외란 인가 시 곧 회복함을 알 수 있다. 또한, 1sec에서 스트로크 진폭 명령치를 0.01m에서 0.03m로 스텝 변경하였음에도 명령



(c) 스트로크의 출력 파형 확대



(d) 스트로크 진폭 명령치와 응답비교

그림 8. 위상제어 시스템의 전류 및 스트로크 파형
Fig. 8. Waveform of current and stroke for phase control system.

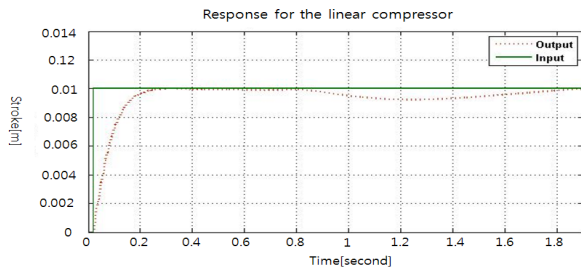


그림 9. 위상제어가 없는 경우 스트로크 응답 특성

Fig. 9. Stroke response without phase controller.

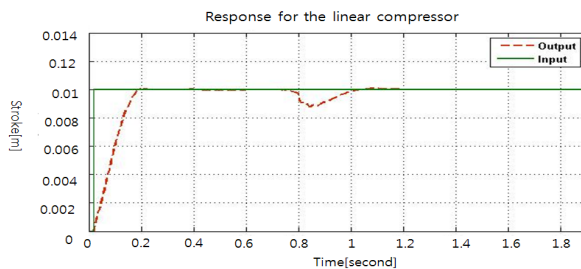


그림 10. 위상제어가 있는 경우 스트로크 응답 특성

Fig. 10. Stroke response with phase controller.

치를 빠른 시간내에 추종하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 위상제어기의 성능을 보다 명확히 알아보기 위해 그림 5에서 전류제어 루우프를 제거한 상태에서, 위상제어기가 없는 경우와 위상제어기를 포함하는 경우의 모의실험 결과가 각각 그림 9와 그림 10에 보여준다. 그림 9의 위상제어 없이 스트로크 제어할 경우보다 그림 10의 위상제어 루우프를 포함하여 스트로크를 제어하는 경우가 외란에 대해 훨씬 빨리 복귀됨을 확인할 수 있었다.

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 스트로크 위상 제어 시스템을 구현하고 본 연구의 실현 가능성을 보이기 위해 몇 가지 모의실험을 수행한 결과, 위상제어 없이 스트로크 제어할 경우보다 위상제어 루우프를 포함해서 스트로크를 제어할 경우가 초기 응답 특성이 향상되고, 정상상태의 오차가 적어지는 성능 향

상을 확인할 수 있었다. 실제 냉장고나 에어컨에 적용된 리니어 컴프레서에 본 알고리즘을 적용하여 실용적으로 유용함을 보이고 그 장단점을 다양하게 분석할 필요가 있다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] Reuven Unger, "Linear compressors for non-CFC refrigeration," Proceedings International Appliance Technical Conference, 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, July 23-26, 1996.
- [3] Reuven Unger, "Linear compressors for clean and specialty gases," Proceedings International Compressor Engineering Conference, July 14-17, 1998.
- [4] Reuven Unger, "Development and testing of a linear compressor sized for the european market," Proceedings International Appliance Technical Conference, 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, 이철웅, 이재춘, 황민규, 김정철, "리니어 컴프레서용 LOA의 스트로크 센서 없는 제어 방법" 전력전자학술대회 논문집, pp.650-656, 2001.
- [9] 정세교, 이대식, "PLL기법을 이용한 단상 PWM 인버터의 정상상태 성능개선," 전력전자학회 논문지, 9권, 4호, pp.356-363, 2004.
- [10] 권기현, 단상 인버터의 순시전압 제어장치 및 방법, 대한민국특허, 등록번호:10-0576693, 등록일:2006.4. 27.

- [11] 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. 1.
- [12] 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. 8.
- [13] 남재우, 오준태, 김규식, "리니어모터의 매개변수 추정과 근사화의 오차분석," 전자공학회 논문지 49권 SC편 4호, pp.61-68, 2012. 7.
- [14] 오준태, 김규식, "전류제어 루프를 갖는 선형압축기 스트로크 제어기의 동적성능 향상에 관한 연구, 전자공학회 논문지, 50권 SC편, 8호, pp.2202-2210, 2013. 8.

— 저 자 소 개 —



남 재 우(정회원)
1992년 수원대학교 전기공학과
학사 졸업.
2009년 연세 대학원 전기공학과
석사 졸업.
2009년 서울시립대학교 전자전기
컴퓨터공학부 박사과정.
<주관심분야 : 센서네트워크, 제어, 에너지 변환>



오 준 태(정회원)
1998년 동국대학교 전기공학과
학사 졸업.
2003년 동 대학원 전기공학과
석사 졸업.
2011년 서울시립대학교 전자전기
컴퓨터공학부 박사졸업
2003~현재 도시철도공사 근무
<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>