

논문 2012-50-4-25

위상지연필터를 이용한 리니어 모터 피스톤 진폭 추정기의 구현

(Implementation of Linear Motor Piston Amplitude Estimator Using Phase Lag Filter)

오 준 태*, 김 규 식*

(Joon-Tae Oh and Gyu-Sik Kim)

요 약

본 논문에서는 위상지연필터를 이용한 리니어 모터 피스톤 진폭 추정기를 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 피스톤 진폭을 정확하게 추정하는 것이 리니어 컴프레서의 동특성을 좌우하는데, 본 연구에서는 위상지연필터를 이용한 피스톤 진폭 추정기를 제안하고 성능이 우수함을 모의실험을 통해 확인하였다.

Abstract

In this paper, a linear motor piston amplitude estimator using phase lag filter has been implemented. 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 linear motor piston amplitude estimator using phase lag filter is proposed and the superior performance of our estimator is verified via some simulation studies.

Keywords: linear compressor, linear motor, stroke, piston amplitude estimator, phase lag filter

I. 서 론

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].

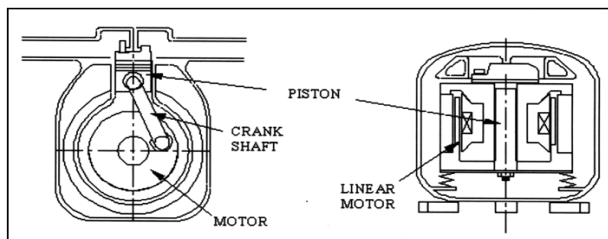
그림 1과 같이 기존의 왕복동식 컴프레서에서는 회전하는 로터리 모터의 운동을 크랭크 축에 의해 직선으로 바꾸어 주는 반면, 리니어 컴프레서는 피스톤이 리니어모터에 의해 직접 구동되는 피스톤 타입 컴프레서이다. 리니어 컴프레서에서는 모든 구동 힘이 직선운동 방향으로 가해지기 때문에 피스톤에 의해 측면방향의 미는 힘이 발생하지 않는다. 이에 따라, 기존의 왕복동식 컴프레서에 비해 마찰손실이 작고 운전 중에 소음이 작다^[1].

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

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

접수일자: 2013년1월14일, 수정완료일: 2013년3월18일

또한, 왕복동식 컴프레서의 경우 단상유도전동기를 사용시 정속운전이 가능하며 모터효율이 90%이하인 반면, 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]. 유럽시장을 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]. 리니어 모터의 동작원리는 그림 2에 있다. 코일에 흐르는 교류 전류에 의한 교번 자기장과 미그네트에 의한 자기장에 의하여 마그네트를 진동하는 힘이 발생하고 이 진동력이 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



(a) 왕복동식 컴프레서 (b) 리니어 컴프레서

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

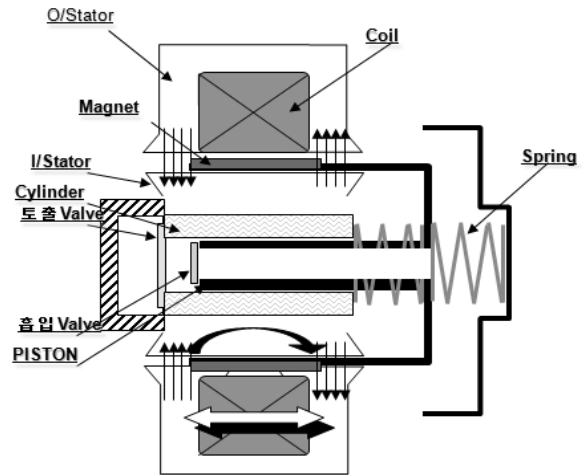


그림 2. 리니어 모터의 동작 원리
Fig. 2. Operating principle of a linear motor.

따라 커지게 된다.

본 논문에서는 위상지연필터를 이용한 리니어 모터 피스톤 진폭 추정기를 구현하였다. 리니어 컴프레서의 냉각능력을 제어하기 위해서는 피스톤의 속도를 제어해야 한다. 주파수나 스트로크를 조정함으로써 가능한데 주파수를 고정하고 스트로크를 변화시키는 것이 일반적이다. 스트로크, 즉 피스톤 진폭을 정확하게 추정하는 것이 리니어 컴프레서의 동특성을 좌우하는데, 위상지연필터를 이용한 피스톤 진폭 추정기를 제안하고 성능이 우수함을 모의실험을 통해 확인하였다.

II. 본 론

2.1 리니어 컴프레서의 수학적인 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 추력, 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

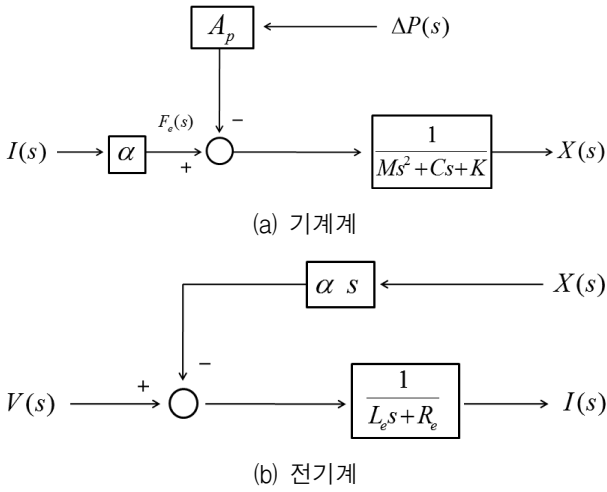


그림 3. 리니어 모터의 동적 시스템 블록선도
Fig. 3. Block diagram of linear motor dynamic system.

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 블록 선도는 그림 3과 같다.

그림 3에서 리니어 모터의 시스템 동적 모델링은 다음과 같다.

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

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

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

2.2 리니어 모터의 피스톤 위치 추정

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 필요하

다. 이를 위해서는 정확한 피스톤의 위치 정보가 필요하다. 정확한 위치를 측정하기 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 같은 위치측정 자기센서를 이용할 수도 있지만 이러한 센서들은 가격이 고가일 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. 식 (2)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 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, ...

여기서 T는 샘플링주기이다.

2.3 피스톤 진폭 추정기의 구현

기존 왕복동식 압축기는 피스톤이 크랭크 샤프트에 의해 구속되어 일정한 스트로크(행정거리)를 실린더 내에서 왕복 운동하고 있는 반면에 리니어 압축기의 피스톤은 어느 한 곳에 구속됨 없이 단지 공진 스프링에 의해 지지 되어 있기 때문에 스트로크의 조절이 가능하다. 그래서 시스템상의 부하나 주위온도에 따라 스트로

크 조절이 자유롭기 때문에 냉장고에 적용시 소비전력 저감에 큰 효과를 나타낸다. 리니어 컴프레서가 적용된 냉장고나 에어컨의 냉각능력을 제어하기 위해서는 단위 시간동안 피스톤의 움직인 거리, 즉 피스톤의 속도를 제어해야 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.

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

2.3.1 RMS 방식의 피스톤 진폭 추정

식 (10)의 피스톤 위치 파형으로부터 X_m 을 추정하는 손쉬운 방법은 식 (11)과 같이 RMS (Root Mean Square) 값을 연산하는 것이다.

$$\widehat{X}_m(t) = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x^2(t) dt} \quad (11)$$

이와 같은 실효치 방식의 피스톤 진폭 추정은 한주기마다 피스톤 위치 파형의 실효치를 계산하여 제어해야 하므로 구조가 간단하나 동특성이 느려 급격한 부하변동이나 비선형 부하에 대해 제어성능이 나쁘다는 단점이 있다^[9~10].

2.3.2 위상지연 필터 방식의 피스톤 진폭 추정

피스톤 진폭을 추정하는 방식으로 위상지연 필터를 이용하는 방안을 본 논문에서 제안한다. θ [rad] 위상지연 필터는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$H_d(s) = \frac{120\pi - \beta s}{120\pi + \beta s} \quad (12)$$

여기서 $\beta = 1$ 이면 다음 식이 성립한다.

$$|H_d(j\omega)| = 1 \quad (13)$$

$$\angle H_d(j\omega) = -\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = -\frac{\pi}{2} [rad] \quad (14)$$

즉, $\beta = 1$ 이면 식 (12)는 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,

$$x_d(t) = X_m \sin(\omega t + \phi) \quad (15)$$

따라서, 다음의 피스톤 진폭 추정식을 얻을 수 있다.

$$\widehat{X}_m(t) = \sqrt{x^2(t) + x_d^2(t)} \quad (16)$$

2.3.3 Arctan 방식의 피스톤 진폭 추정

본 논문에서 제안하는 피스톤 진폭을 추정하는 다른 하나의 방식은 arctan 공식을 이용하는 것이다. 다음과 같이 $\hat{\theta}$ 을 정의한다.

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

그러면, 다음과 같이 피스톤 진폭을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{X}_m(t) &= x(t) \cos \hat{\theta} + x_d(t) \sin \hat{\theta} \\ &= X_m \cos(\omega t + \phi) \cos \hat{\theta} + X_m \sin(\omega t + \phi) \sin \hat{\theta} \\ &= X_m \cos(\omega t + \phi - \hat{\theta}) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $\hat{\theta} \cong \omega t + \phi$ 이면 $\widehat{X}_m \cong X_m$ 이 성립한다.

2.4 모의실험에 의한 성능 평가

앞 절에서 언급한 세 가지 형태의 피스톤 진폭 추정 알고리즘의 성능평가를 위해 그림 4와 같은 리니어 모터의 스트로크 제어 시스템 블록선도를 구성하였다. $M = 0.333\text{kg}$, $C = 3.5\text{Ns/m}$, $K = 62,500\text{N/m}$, $\alpha = 71\text{Vs/m}$, $L_e = 0.42\text{H}$, $R_e = 11.4\Omega$ 의 매개변수를 갖는 리니어 모터에 대해 $t = 0$ 에서 $X_m^*(s) = 0.01\text{m}$ 를 스텝입력하고, $t = 1.5\text{sec}$ 에서 외란입력 $D(s) = 50\text{V}$ 를 스텝입력하였을 때의 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 제안한 세 가지 방식의 피스톤 진폭 추정기의 성능이 피스톤 위치 추정 시 생길 수 있는 노이즈에 얼마나 강인하기를 평가하기 위해 피스톤 주파수의 10배인 600Hz의 주파수와 진폭이 피스톤위치의 5%인 0.0005m를 갖는 정현파신호 $N(s)$ 를 가했다. 또한, 제어 시스템의 샘플링 시간은 0.8msec로 하였다.

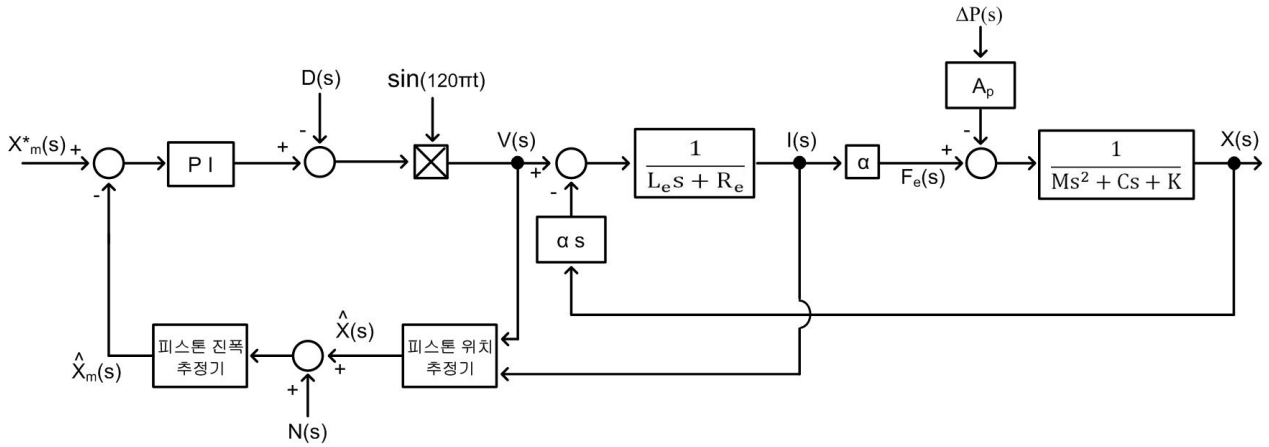


그림 4. 리니어 모터의 스트로크 제어 시스템 블록선도
 Fig. 4. Block diagram of linear motor stroke control system.

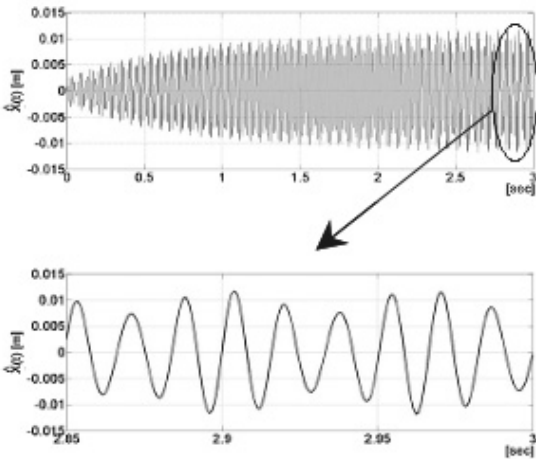


그림 5. RMS 방식의 피스톤 위치 추정 결과
 Fig. 5. Simulation result of RMS type piston position estimation

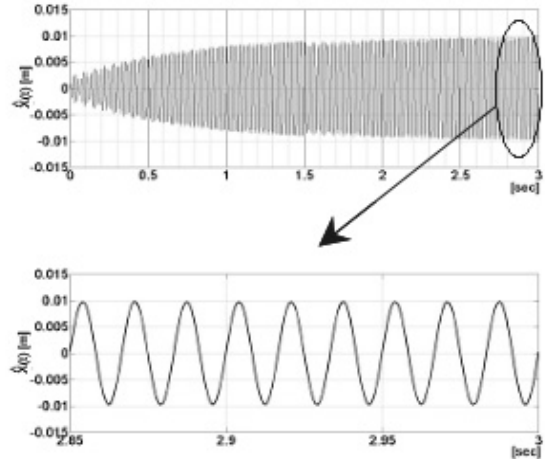


그림 7. Arctan 방식의 피스톤 위치 추정 결과
 Fig. 7. Simulation result of Arctan type piston position estimation.

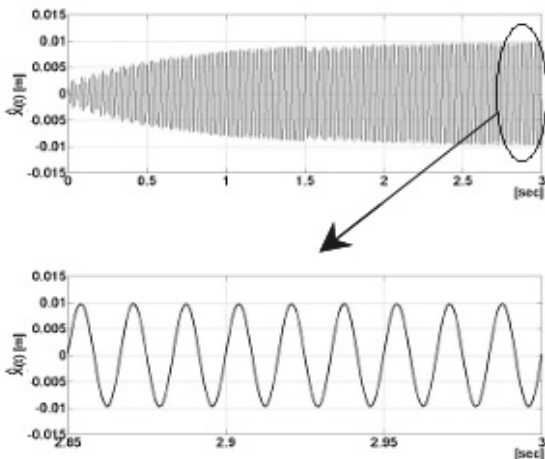
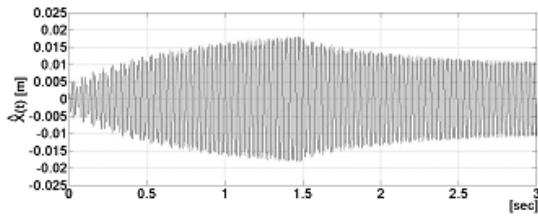


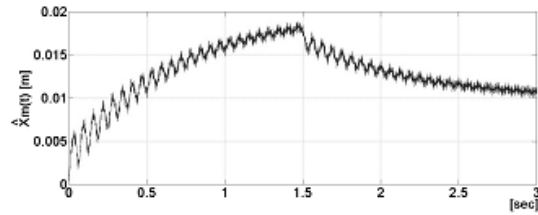
그림 6. 위상지연필터방식의 피스톤위치 추정결과
 Fig. 6. Simulation result of phase lag filter type piston position estimation.

RMS, 위상지연필터, Arctan 방식의 피스톤 진폭 추정기에 대한 각각의 시뮬레이션 결과가 그림 5, 그림 6, 그림 7에 있다. 각각의 그림에서 (b)는 (a)에서 2.85sec - 3.0sec 구간을 확대한 것이다. 정상상태에서의 피스톤 위치 추정결과는, RMS 방식은 16.8%. 위상지연필터 방식은 1.5%, Arctan 방식은 1.6%의 오차를 각각 보였다. 이와 같은 RMS 방식의 피스톤 진폭 추정은 한주기마다 피스톤 위치 파형의 실효치를 계산하여 제어해야 하므로 동특성이 느려 급격한 부하변동이나 노이즈와 같은 외부변수에 대해 제어성능이 나쁘다는 단점 때문에 오차가 상대적으로 큰 것이라고 판단된다.

그림 6의 위상지연필터 방식에 대한 동특성을 조금 더 알아보기 위해 추가적인 시뮬레이션을 수행하였다. 위에서 행한 시뮬레이션의 조건과 같은 상황에서 외란

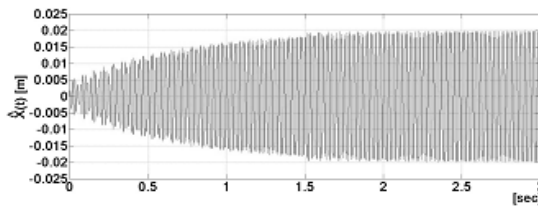


(a) $\hat{x}(t)$

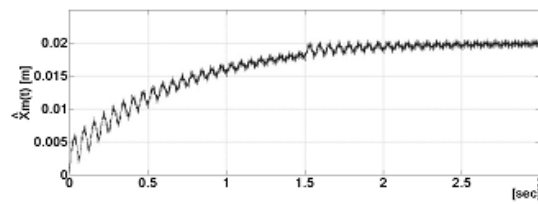


(b) $\hat{X}_m(t)$

그림 8. 위상지연필터방식의 피스톤위치 추정 I
Fig. 8. Simulation result I of phase lag filter type piston position estimation.



(a) $\hat{x}(t)$



(b) $\hat{X}_m(t)$

그림 9. 위상지연필터방식의 피스톤위치 추정 II
Fig. 9. Simulation result II of phase lag filter type piston position estimation.

입력 $D(s) = 0V$ 로 놓고, $t = 0$ 에서 $X_m^*(s) = 0.02m$ 를 스텝입력하였다가 $t = 1.5sec$ 에서 $X_m^*(s) = 0.01m$ 로 줄여준 경우의 결과가 그림 8에 있다. 또한, $t = 0$ 에서 $X_m^*(s) = 0.02m$ 를 스텝입력하였다가 $t = 1.5sec$ 에서 외란입력 $D(s) = -50V$ 로 스텝입력하였을 때의 결과가 그림 9에 있다. 그림 8과 그림 9에서 볼 수 있듯이 피스톤진폭 추정기의 출력인 $\hat{X}_m(t)$ 는 앞단의 노이즈

성분 때문에 다소 리플이 존재하지만 페루우프 제어기에 의해 보상되어 피스톤 위치 추정기의 출력인 $\hat{x}(t)$ 는 정상상태에서 거의 일정하게 유지됨을 확인하였다.

III. 결 론

리니어 컴프레서의 냉각능력을 제어하기 위해서는 피스톤의 속도를 제어해야 하는데 주파수나 스트로크를 조정함으로써 가능하다. 주파수를 고정하고 스트로크를 변화시키는 것이 일반적이다. 스트로크, 즉 피스톤 진폭을 정확하게 추정하는 것이 리니어 컴프레서의 동특성을 좌우하는데, 위상지연필터를 이용한 피스톤 진폭 추정기를 제안하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 기존의 RMS 방식의 피스톤 위치 추정 결과에 비해 상당한 성능개선이 있었고 외란이나 노이즈에 강한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [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 컴프레샤용 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.

 저 자 소 개



오 준 태(정회원)
 1998년 동국대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 2003년 동 대학원 전기공학과
 석사 졸업.
 2009년 서울시립대학교 전자전기
 컴퓨터공학부 박사과정.

<주관심분야 : 센서네트워크, 제어, 에너지 변환>



김 규 식(정회원)
 1981년 서울대학교
 전자공학과 졸업
 1983년 동 대학원 제어계측공학과
 석사 졸업
 1990년 동 대학원 제어계측공학과
 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>