2013년 8월 전자공학회 논문지 제 50 권 제 8 호
Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea Vol. 50, NO. 8, August 2013 http://dx.doi.org/10.5573/ieek.2013.50. 8.274

논문 2013-50-8-33

전류제어 루프를 갖는 선형 압축기 스트로크 제어기의 동적 성능 향상에 관한 연구

(A Study of the Dynamic Performance Improvement of a Linear Compressor Stroke Controller with a Current Control Loop)

오 준 태*, 김 규 식*

(Joon-Tae Oh and Gyu-Sik Kim©)

요 약

본 논문에서는 위상지연필터를 이용한 전류제어 루프를 갖는 선형압축기의 스트로크 제어기를 구현하였다. 선형압축기가 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. 인가된 전류를 정밀하게 제어하는 것이 선형압축기의 동특성을 좌우하는데, 본 연구에서는 전류제어 루프를 갖는 피스톤 진폭 제어기를 제안하고 성능이 우수함을 모의실험을 통해 확인하였다.

Abstract

In this paper, a linear motor stroke controller using a phase lag filter and a single phase PWM inverter with a current controller 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. Generally, the frequency is fixed, for example, as 60Hz and the stroke is adjusted. The dynamic performance of linear compressors depends on how accurately the stroke or the piston position is controlled by the current applied. A linear motor piston position controller with a current control loop is proposed and verified via some simulation studies.

Keywords : linear compressor, stroke, current control loop, position controller, PWM inverter

Ⅰ. 서 론

냉장·냉동 시스템에서 압축기는 심장과 같은 역할을 하며, 흡입, 압축, 응축, 토출의 연속적인 냉동 사이클로 냉매 가스를 순환시키고, 열 교환을 통해 온도를 낮추는 기능을 갖는다. 기존의 왕복동식 압축기는 회전력을 왕복 동력으로 변환하면서 실린더 벽과 피스톤에 영향을 주는 측력에 의한 마모, 진동, 그리고 노이즈 발생 등의 문제점을 가지고 있다. 반면에 그림 1과 같은 선형압축기는 모든 구동력이 직선방향으로 가해지고, 피스톤에 의해 측면방향의 힘이 발생하지 않기 때문에 기존의 왕복동식 압축기에 비해 마찰 손실이 적고 운전 중 소음이 적으며, 회전운동을 직선운동으로 바꿀 때

* 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: 2013년4월25일, 수정완료일: 2013년7월23일

소요 되는 에너지 손실이 적어 에너지 효율이 높다는 특징을 갖는다. 압축기는 냉장고에서 소비되는 전력의 약 80[%]의 에너지 소비하기 때문에, 에너지 절감을 위한 고효율 선형압축기에 대한 많은 연구들이 진행되었다[1~10]. 또한, 에너지변환 효율을 향상시키기 위해 전력용 반도체를 이용한 전력 변환 장치(트라이악 이나 단상 인버터)를 사용하여 에너지 변환 효율 개선에 관한 연구들도 진행 되었다. 피스톤의 위치를 제어하기 위한 위치 센서의 장착으로 압축기의 가격이 상승하고, 배선이 복잡해지는 등의 문제점을 해결하기 위해 센서리스 형태로 정확한 위치 추정을 통해서 압축기의 제어 성능을 향상시키는 방법에 관한 연구들이 진행 되었다. 트라이악을 사용하는 경우 다른 전력 변환장치 소자들에 비해 가격이 비교적 저렴하고 단상 교류 전압의 제어가 용이하여 많이 사용해 왔으나 전압과 전류를 측정하여 간접적으로 피스톤의 위치를 추정하는 경우 전압 및 전류의 왜곡으로 인해 정확한 위치 추정이 어렵고, 전압과 전류에 고조파가 발생되어 전력의 품질을 떨어뜨리는 문제점들 때문에 단상 인버터를 적용하여 에너지 변환 효율과 제어 성능을 향상하고자 하는 연구들이 수행되고 있다[11~12].

선형압축기의 동작원리는 그림 2에 나타내었다. 전자계(電磁界)에 위치한 코일에 전류를 인가할 때, 코일의 전류에 따라서 피스톤은 전자계 영향으로 축 방향을 따라서 좌·우로 움직이게 될 것이다. 교류 전류가 증가하게 되면 자기장은 반시계 방향으로 점차 증가하고, 자기장은 피스톤에 연결된 전자석을 왼쪽으로 밀게 된다. 교류 전류가 감소하여 0이 될 때, 전자석은 가장 왼쪽 위치에 도달하고, 전류가 반대방향으로 흐르게 되면 전자석은 오른쪽 방향으로 움직이게 되며, 전류가 다시 0점에 위치하면 전자석은 가장 오른쪽 지점에 도달함으로써 좌·우로 주파수에 따라 진동하게 된다. 즉, 전류의 진폭에 따라서 피스톤 위치의 진폭도 증·감됨을 알 수 있다.

선형압축기의 냉각능력을 제어하기 위해서 피스톤의 위치나 속도를 제어하는데 주파수나 스트로크를 조절함으로써 가능하다. 주파수를 고정하고 스트로크의 진폭을 증·감하면 냉각능력을 제어하기 용이하기 때문에 본 논문에서는 스트로크의 진폭을 조절할 수 있는 단상 인버터를 적용하였다. 선형 압축기 스트로크(피스톤 위치)는 정상상태에서 빠른 응답성과 외란이 발생하였을 때

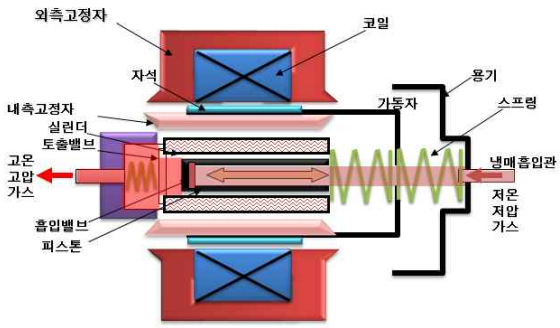


그림 1. 선형 압축기의 구조
Fig. 1. Structure of a linear compressor.

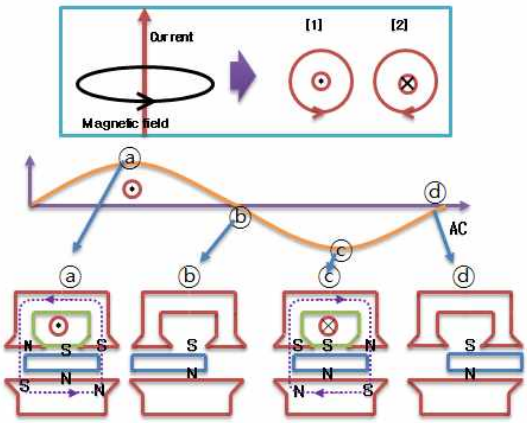


그림 2. 선형 압축기의 동작 원리
Fig. 2. Operating principle of a linear compressor.

빠른 추종 특성이 냉각능력을 좌우하기 때문에 선형압축기의 동특성을 향상시키기 위한 전류제어 루프를 갖는 피스톤 위치 제어기의 동적 성능 향상 방안에 대해서 논의하고, 그 성능의 우수성을 단상 인버터와 정현파 펄스폭 변조를 이용한 모의실험을 통해 확인하였다.

II. 본 론

2.1 선형 압축기의 수학적인 등가 모델

선형압축기 내에 있는 리니어 모터의 피스톤은 기구적으로 구속되어 있지 않기 때문에 피스톤이 일정한 영역 내에서 안전하게 진동하고 실린더의 헤드에 부딪히지 않도록 피스톤의 위치를 정확하게 제어할 필요성이 있다. 또한, 냉각을 위한 냉매의 유량제어를 위해서도 피스톤의 위치 제어가 반드시 필요하다.

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

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

여기서 M은 피스톤과 무빙코일의 등가질량이며, C는 점성댐핑계수, K는 스프링상수, α는 리니어 모터의 추력상수, A_p는 피스톤의 단면적, $x(t)$는 리니어 모터의 변위, $i(t)$는 권선에 흐르는 전류, $\Delta P(t)$는 압축기 챔버와 피스톤 후면의 압력 차이다.

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. 식 (1) - (3)을 이용한 선형압축기의 등가모델은 그림 3과 같다.

다음은 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 수 있는 한 가지 방법을 보여준다. 식 (2)를 $x(t)$ 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dx(t)}{dt}=\frac{1}{\alpha}\left(v(t)-L_e\frac{di(t)}{dt}-R_e i(t)\ \right) \quad (4)$$

식 (4)를 적분한 피스톤 위치의 추정값 $\hat{x}(t)$ 는 다음과 같다.

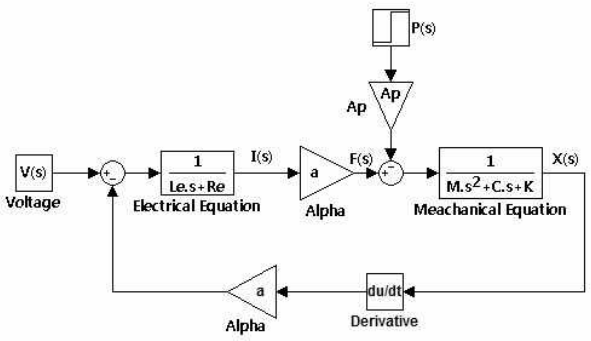


그림 3. 선형 압축기의 등가 모델
Fig. 3. Equivalent circuit model of a linear compressor

$$\hat{x}(t)=\ \int_0^t\left(\frac{dx}{d\tau}\right)\ d\tau$$

$$=\ \frac{1}{\alpha}\int_0^t\left[v(\tau)-R_e i(\tau)\right]\ d\tau-\frac{L_e}{\alpha}\,i(t) \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 피스톤의 위치를 간접적으로 추정할 때 α와 L_e의 값은 비선형적으로 피스톤의 위치에 따라 변화 하지만, 본 논문에서는 α와 L_e의 값을 상수로 놓고 피스톤의 위치를 추정한다[13~14].

2.2 피스톤 위치 및 전류의 크기 추정

기존 왕복동식 압축기는 피스톤이 크랭크 샤프트에 의해 구속되어 일정한 스트로크를 실린더 내에서 왕복운동하고 있는 반면에 선형압축기의 피스톤은 어느 한 곳에 구속됨 없이 단지 공진 스프링에 의해 지지되어 있기 때문에 피스톤의 위치의 조절이 가능하다. 스트로크 조절이 자유롭기 때문에 냉장고에 적용 시 소비전력 저감에 큰 효과를 나타낸다. 선형압축기가 적용된 냉장고나 에어컨의 냉각능력을 제어하기 위해서는 단위시간 동안 피스톤의 움직인 거리, 즉 피스톤의 속도를 제어해야 하는데 선형압축기의 주파수나 스트로크를 제어함으로써 가능하다. 이때, 주파수를 고정하고 피스톤의 위치를 증·감하면 냉각능력을 제어하기 용이하다. 만일 리니어 모터의 피스톤 위치가 식 (6)처럼 표현된다면 스트로크는 $2X_m$ 이 된다. 따라서, 스트로크를 제어하려면 X_m 의 크기를 제어하는 것과 마찬가지며 이를 위해 식 (6)의 피스톤 위치 파형으로부터 X_m 을 추정해야 함을 의미한다.

$$x(t)=X_m\cos(\omega t+\phi) \quad (6)$$

식 (6)의 피스톤 위치 파형으로부터 X_m 을 추정하는 손쉬운 방법은 식 (7)과 같이 RMS (Root Mean Square) 값을 연산하는 것이다.

$$\widehat{X_m}(t)=\ \sqrt{2}\ \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}x^2(t)dt} \quad (7)$$

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 있

다[11~12].

피스톤 진폭을 추정하는 방식으로 위상지연 필터를 이용하는 방안을 본 논문에서 제안한다. 한편, 위상지연 필터는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$H_d(s) = \frac{120\pi - \beta s}{120\pi + \beta s} \tag{8}$$

여기서 입력신호(피스톤위치신호)의 주파수가 60Hz 이므로, $\beta = 1$이면 다음 식이 성립한다.

$$|H_d(jw)| = 1 \tag{9}$$

$$\angle H_d(jw) = -\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = -\frac{\pi}{2}[rad] \tag{10}$$

즉, $\beta = 1$ 이면 식 (8)는 90^o ($\frac{\pi}{2}$라디안) 위상지연 필터 기능을 한다. 식 (6)의 $x(t)$ 가 90^o 위상지연 필터를 통과한 것을 $x_d(t)$ 라 하면,

$$x_d(t) = X_m \sin(\omega t + \phi) \tag{11}$$

따라서, 다음과 같은 피스톤 진폭 추정식을 얻을 수 있다.

$$\widehat{X_m}(t) = \sqrt{x^2(t) + x_d^2(t)} \tag{12}$$

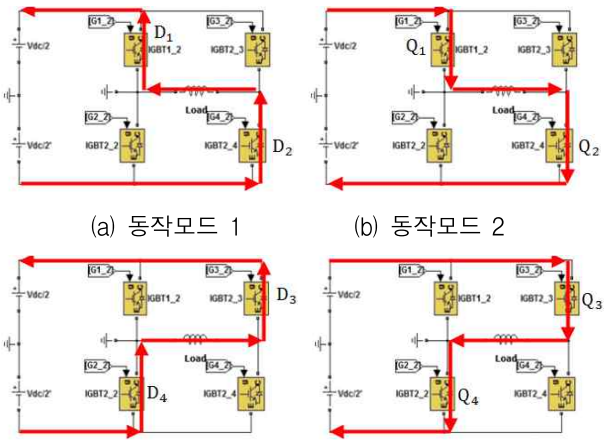
한편, 리니어 모터의 전류 $i(t)$ 도 크기가 I_m 으로 표현되는 정현파일때, 다음과 같은 전류진폭 추정식을 얻을 수 있다.

$$\widehat{I_m}(t) = \sqrt{i^2(t) + i_d^2(t)} \tag{13}$$

식 (13)에서 $i_d(t)$는 $i(t)$ 가 90^o 위상지연 필터를 통과한 것이다.

2.3 단상 풀브리지 인버터의 동작 원리

그림 4는 두 개의 암(Arm)을 갖는 단상 풀브리지 인버터를 나타낸다. 직류 입력 전원으로부터 단상 교류 출력 전압을 발생하여 부하에 전력을 공급하는 역할을 하는 에너지 변환장치이다. 단상 풀브리지 인버터의 전원부에는 정류부로부터 전압을 평활시키는 콘덴서 C_1과 C_2에 충전된 전압 V_1과 V_2로 구성된다. 스위치는 IGBT 4개로 구성 되어 있으며, 각 암에 두개 씩 직렬로 연결되어 있다.



(a) 동작모드 1 (b) 동작모드 2

(c) 동작모드 3 (d) 동작모드 4

그림 4. 단상 풀브리지 인버터의 동작모드
Fig. 4. Operating mode of a single phase full-bridge inverter.

단상 풀브리지 인버터는 4개의 동작 모드로 설명할 수 있으며, 모드 1의 경우에는 다이오드 D_1과 D_2가 도통하는 회생 모드로 부하에 저장된 에너지를 전원으로 반환하는 회생모드이다. 모드 2의 경우에는 스위치 Q_1과 Q_2가 도통하는 모드로 정극성의 부하전류가 흐르게 되며, 부하에 전력을 공급하는 동작모드이다. 모드 3의 경우에는 다이오드 D_3과 D_4가 도통하는 모드로 정극성의 부하 전류를 다시 전원으로 환원하는 회생모드로 동작한다. 모드 4의 경우에는 스위치 Q_3과 Q_4 가 도통하는 모드로 부극성의 부하전류가 부하에 흐르게 되며, 부하에 전력을 공급하는 동작모드이다.

단상 풀브리지 인버터는 서로 독립적으로 스위칭을 할 수 있는 2개의 상으로 구성되며, 정현파 펄스폭 변조를 사용하여 전압을 제어하는 것이 가능하다. 단상 풀브리지 인버터를 정현파 펄스폭 변조를 할 때, 각 상의 스위칭 동작은 그림 5와 같이 2개의 기준파 V_{r1}과 V_{r2}, 진폭변조지수 m_a와 주파수 f을 갖는다. V_{r1}과 V_{r2}의 위상차는 180°이며, 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{r1} = -V_{r2} = m_a \sin(2\pi ft) \tag{14}$$

정현파 펄스폭 변조의 진폭 변조지수(m_a)는 식(15)와 같이 정의된다.

$$m_a = \frac{m_r}{m_c} \tag{15}$$

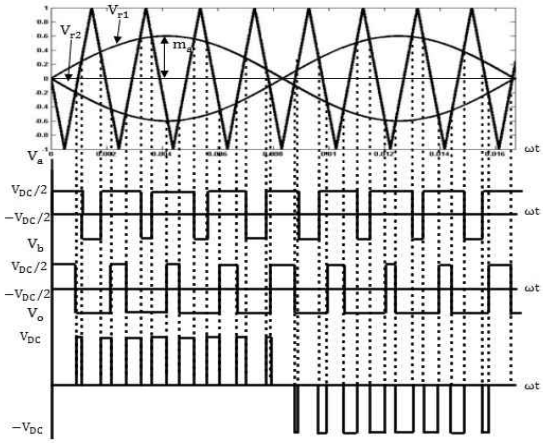


그림 5. 정현파 펄스폭 변조
Fig. 5. Sine wave pulse width modulation

여기서, m_r은 기준파의 진폭이고, m_c은 반송파의 진폭이다.

그림 5는 정현파 펄스폭 변조의 원리를 나타내는 그림으로, $V_{r1} > V_c$인 경우 Q_1은 도통되고, Q_4는 소자 상태가 된다. 따라서 상 전압 V_a는 $V_{DC}/2$의 전압이 형성되며, $V_{r1} < V_c$인 경우 Q_1은 소자되고, Q_4는 도통 상태가 되면서, 상 전압 V_a는 $-V_{DC}/2$의 전압이 형성된다. $V_{r2} > V_c$인 경우 Q_2는 도통되고, Q_3은 소자 상태가 된다. 따라서 상 전압 V_b는 $V_{DC}/2$의 전압이 형성되며, $V_{r2} < V_c$인 경우 Q_2은 소자되고, Q_3은 도통 상태가 되면서, 상 전압 V_b는 $-V_{DC}/2$의 전압이 형성된다. 단상 풀브리지 인버터의 상 전압 V_a와 V_b는 $V_{DC}/2$와 $-V_{DC}/2$의 2단계의 전압 파형을 갖고, 출력 전압($V_o = V_a - V_b$)은 V_{DC}, 0, 그리고 $-V_{DC}$의 3단계의 전압 출력 파형을 갖는다. 3단계의 출력 파형은 정의 반주기 동안에 극성의 변화가 없고, 0 또는 V_{DC}의 전압 값을 가지고, 부의 반주기 동안은 0 또는 $-V_{DC}$를 갖는다. V_{DC}에서 $-V_{DC}$로 직접적인 전압의 변화는 암과 암 사이에 동시적인 스위칭을 필요로 하지만, 0과 V_{DC} 또는 0과 $-V_{DC}$ 사이에 스위칭은 한쪽 암의 스위칭 상태는 고정하고 다른 쪽 암의 스위칭으로 구성할 수 있기 때문에, 단극성의 정현파 펄스폭 변조는 출력 전압 파형의 스위칭 주파수가 2배가 되는 스위칭 효과를 갖고, 부하에 대한 충격도 완화 할 수 있다는 장점을 갖는다[10~13].

2.4 모의실험에 의한 성능 평가

모의실험은 Matlab SIMULINK을 사용하여 수행하였으며, 3kW의 단상 인버터를 사용하였다. 피스톤 위치 제어기에 사용된 비례계수는 k_{ps}= 605이고, 적분계수는 k_{Is}= 573 이다. 전류 제어기에 사용된 비례계수는 k_{pI}= 5.7이고, 적분계수는 k_{II}= 11.5 이다. M =0.186kg, C = 5Ns/m, K = 62,500N/m, α = 60Vs/m, L_e = 0.11H, R_e = 3.4Ω 의 매개변수를 갖는 리니어 모터를 선정하여 모의실험하였다.

그림 6은 피스톤 위치 제어기만을 사용하였을 때의 전체 블록선도이다. 기준 스트로크 입력과 스트로크의 출력이 비교되고 발생된 오차를 통해서 PI제어를 실시

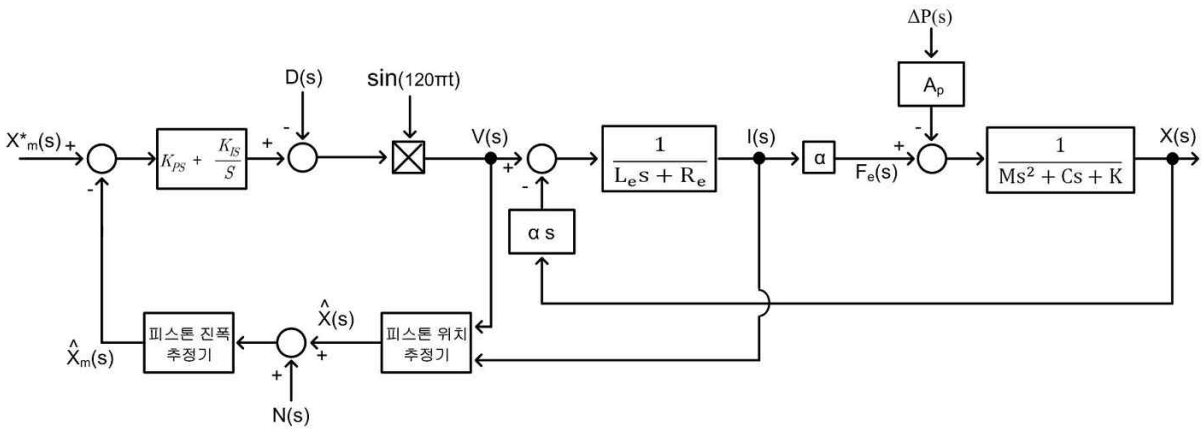


그림 6. 스트로크 제어기를 갖는 선형압축기 제어
Fig. 6. Linear compressor control with a stroke control loop.

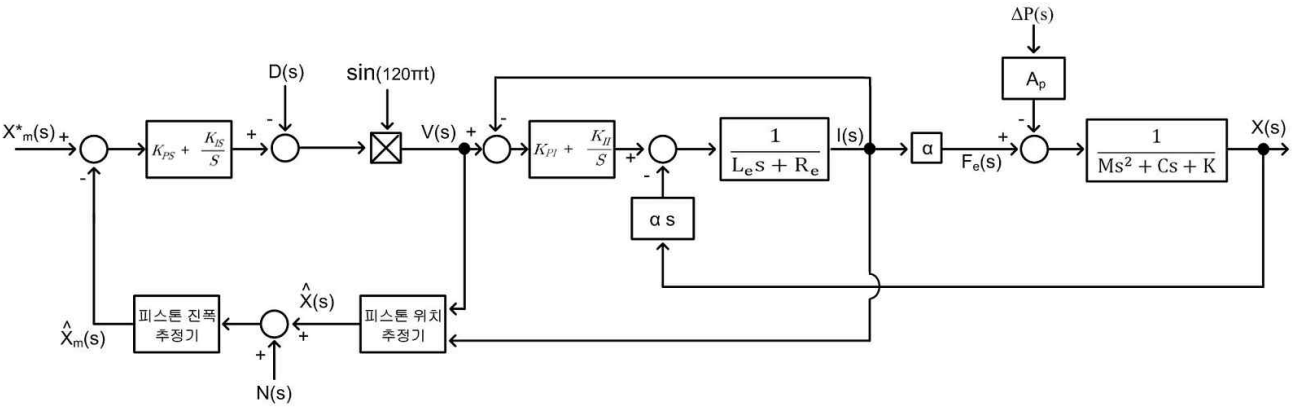
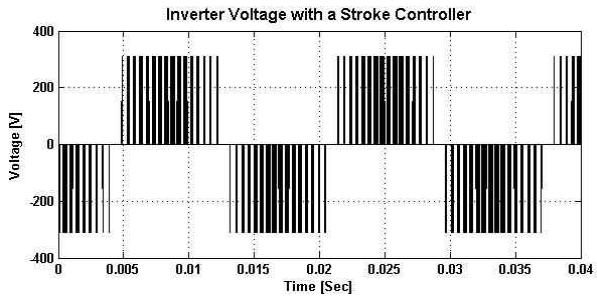
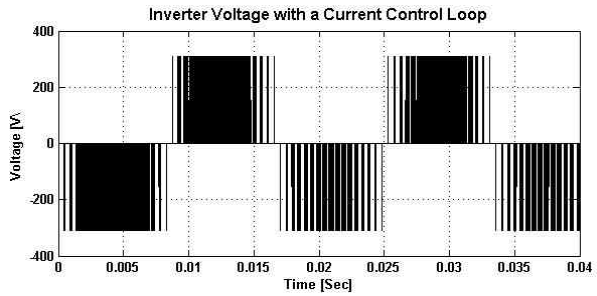


그림 7. 전류 제어 루프가 추가된 선형압축기 제어
Fig. 7. Linear compressor control with a current control loop added.



(a) 스트로크 제어시



(b) 전류 제어 루프가 추가시

그림 8. 인버터의 출력전압
Fig. 8. Output voltages of an inverter.

한다. PI제어기의 출력이 PWM 발생기를 통해서 4개의 IGBT에 도통 신호를 인가하고, IGBT 동작 시, 부하 단에는 DC 311[V]의 전압이 정현파 PWM를 통해서 선형압축기에 인가된다. 선형압축기로부터 전압과 전류를 측정하고, 스트로크를 간접적으로 추정한 뒤, 식 (12)와 같은 피스톤 진폭 추정식을 얻는다.

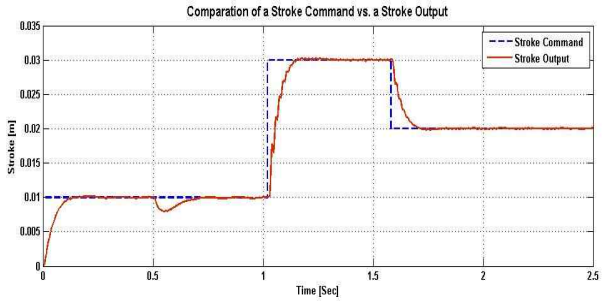
그림 7은 그림 6의 피스톤 위치 제어기에 전류제어 루프가 추가된 블록선도이다. 식 (13)을 이용하여 전류제어를 수행한다.

그림 8의 (a)는 스트로크 제어기 인버터의 출력전압을 나타내며, 그림 8의 (b)는 전류제어 루프가 추가된 경우 초기 0.04초간의 인버터 출력전압을 나타낸다. 전류제어루프를 갖는 선형압축기의 출력 전압이 더 빠르게 반응하고 있음을 알 수 있었다.

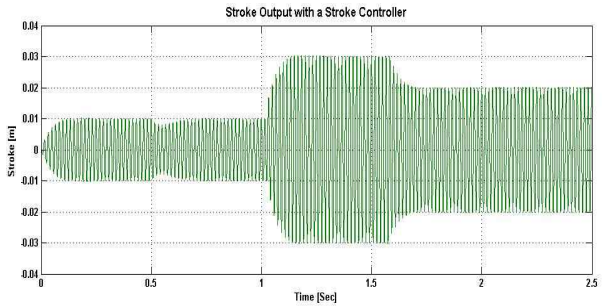
t = 0 에서 피스톤 진폭 X_m 을 0.01m 로 스텝입력하고, t = 0.5sec에서 외란입력을 35V로 스텝입력하였다. 그 후 t = 1sec 에서 피스톤 진폭 X_m 을 0.03m 로 스텝변화를 주었다가 t = 1.6sec에서 다시 0.02m 로 스텝변화를 주었을 때, 스트로크 제어기의 피스톤 위치 응답특성에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 9에 있다. 그림 9(c)와 (d)에서 확인할 수 있듯이 스텝변화나 외란입력에 대해서 대략 0.15초 후 기준 입력을 정확하게 추종함을 알 수 있었다.

그림 9의 경우에 전류루프가 추가되었을 때의 시뮬레이션 결과가 그림 10에 있다. 그림 10에서 알 수 있듯이 스텝변화나 외란입력에 대해서 대략 0.05초 후 기준 입력을 정확하게 추종함을 알 수 있었다. 즉, 그림 9의 경우보다 대략 3배정도의 빠른 응답특성을 보임을 확인할 수 있었다. 그림 9와 그림 10에서 알 수 있듯이 스트로크 제어기만을 사용한 경우보다 전류루프가 추가된 경우에는 외란에 더 강인한 특성을 나타내고 빠른 응답특성을 보임을 알 수 있었고 전류루프 제어기를 통해서 선형압축기의 동특성을 향상 시킬 수 있음을 확인하였다.

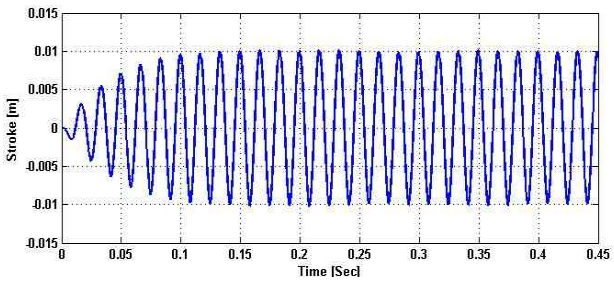
그림 9와 그림 10의 결과는 그림 11과 같이 스트로크 오차 그래프를 보면 확연히 나타난다. 그림 11(a) 의 스트로크 제어기만 있을 경우의 오차 그래프보다 그림



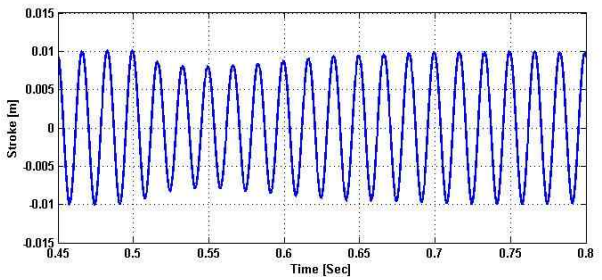
(a) 피스톤 진폭 명령치와 응답 비교



(b) 피스톤 위치 응답

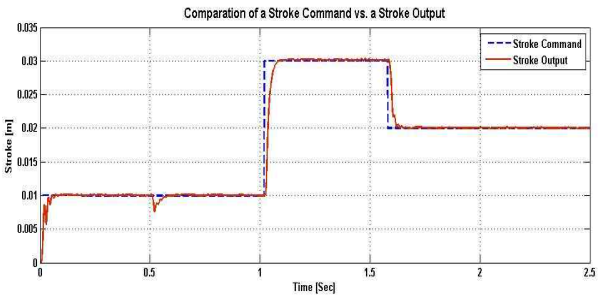


(c) 그림 (b)의 앞 부분을 확대한 경우

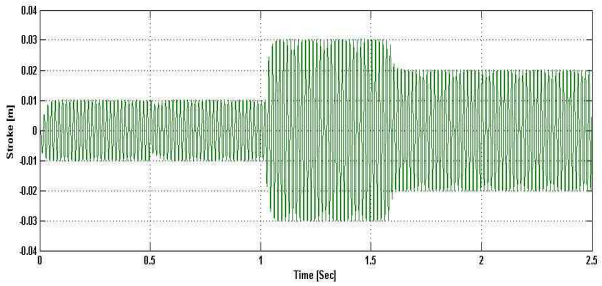


(d) 그림 (b)의 t=0.5sec 근처를 확대한 경우

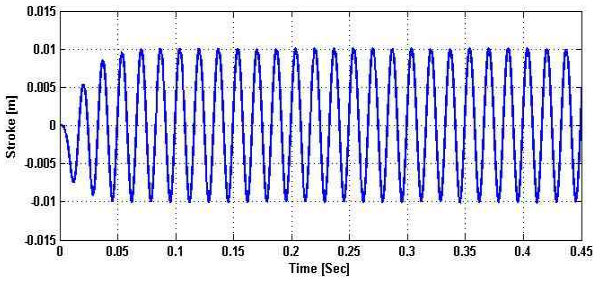
그림 9. 스트로크 제어기의 피스톤 위치 응답특성
Fig. 9. Piston position response of a stroke controller.



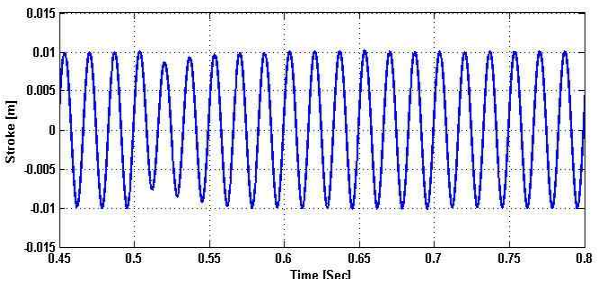
(a) 피스톤 진폭 명령치와 응답 비교



(b) 피스톤 위치 응답



(c) 그림 (b)의 앞 부분을 확대한 경우

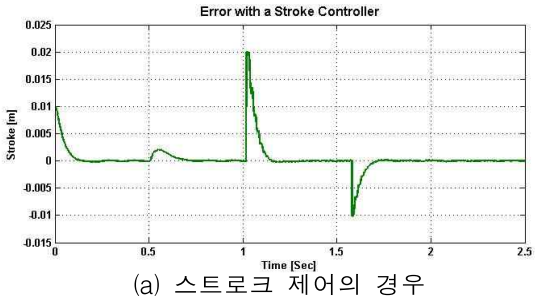


(d) 그림 (b)의 t=0.5sec 근처를 확대한 경우

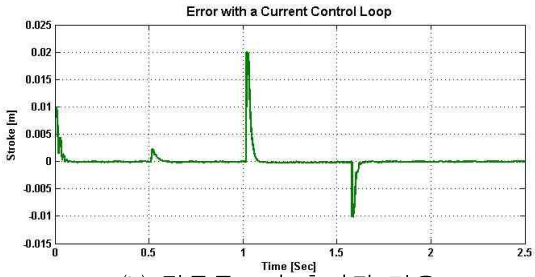
그림 10. 전류루프가 추가된 경우의 응답특성
Fig. 10. Piston position response with a current control loop added.

11(b) 의 전류루프가 추가된 경우의 오차 그래프가 훨씬 빨리 소멸되는 모습을 보여준다.

그림 12에는 출력 전류 그래프를 보여준다. 그림 11에서와 마찬가지로 그림 12(a) 의 스트로크 제어기만 있을 경우의 전류 응답곡선보다 그림 12(b) 나 그림 12(c)의 전류루프가 추가된 경우의 전류 응답곡선이 외란이나 스텝변화에 대해 훨씬 빨리 복귀하고 정상상태

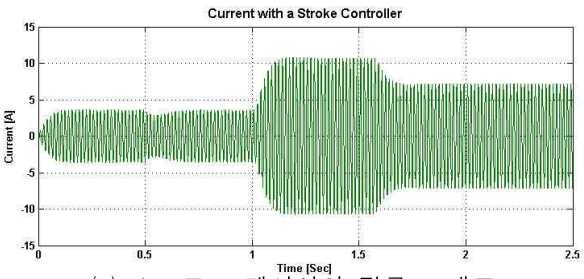


(a) 스트로크 제어의 경우

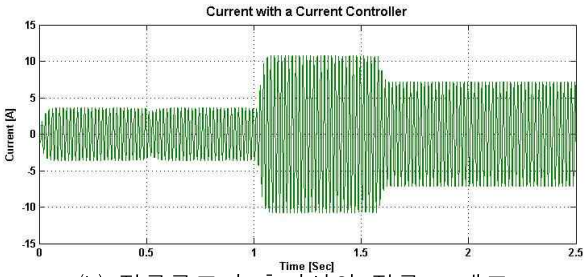


(b) 전류루프가 추가된 경우

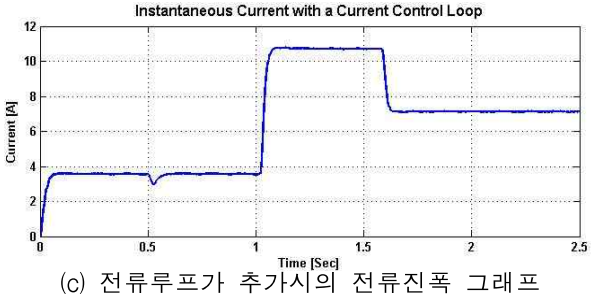
그림 11. 스트로크 오차 비교
Fig. 11. Stroke error comparison



(a) 스트로크 제어시의 전류 그래프



(b) 전류루프가 추가시의 전류 그래프



(c) 전류루프가 추가시의 전류진폭 그래프

그림 12. 출력 전류 그래프
Fig. 12. Output current graph.

에 도달함을 알 수 있다.

그림 (8)~그림 (12)를 통해 전류제어 루프를 갖는 선형압축기 피스톤 위치 제어기법이 피스톤 스트로크 제어기만을 갖는 경우에 비해 응답특성이 우수하고 외란에 강인한 이유는 그림 7에서 전류루프가 전류제어기에 의해 다이내믹스가 무시될 정도로 동특성이 향상되기 때문으로 판단된다.

III. 결 론

선형압축기의 냉각능력을 제어하기 위해서 피스톤의 위치나 속도를 제어하는데 주파수나 스트로크를 조절함으로써 가능하다. 주파수를 고정하고 스트로크의 진폭을 증·감하면 냉각능력을 제어하기 용이하기 때문에 스트로크의 진폭을 조절할 수 있는 단상 인버터를 적용하였다.

본 논문에서는 전류제어 루프를 갖는 선형압축기 피스톤 위치 제어기를 제안하고 구현하였다. 단상 인버터를 이용하여 실제 상황과 매우 유사한 모의실험을 통해 전류제어 루프를 갖는 선형압축기 피스톤 위치 제어기법이 피스톤 스트로크 제어기만을 갖는 경우에 비해 초기 동작특성이 약 3배 정도 빠르게 정상상태에 도달하고, 외란 발생 시와 피스톤 위치 변동 시에도 더 강인하며, 피스톤 위치를 정확하게 추종하는 것을 확인하였다. 전류루프를 갖는 선형 압축기 피스톤의 스트로크 제어기가 동특성 향상에 우수한 특성을 나타내는 것을 모의실험을 통해서 입증하였다.

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 컴프레샤용 LOA의 스트로크 센서 없는 제어 방법” *전력전자학술대회 논문집*, pp.650 -656, 2001
[9] B. J. Huang, Y. C. Chen, “System Dynamics and Control of a Linear Compressor for Stroke and Frequency Adjustment,” *Transactions of the ASME*, Vol. 124, pp. 176-182, March 2002.
[10] 정세교, 이대식, “PLL기법을 이용한 단상 PWM 인버터의 정상상태 성능개선,“ *전력전자학회 논문지*, 9권, 4호, pp.356-363, 2004.
[11] 권기현, 단상 인버터의 순시전압 제어장치 및 방법, 대한민국특허, 등록번호:10-0576693, 등록일:2006.4. 27
[12] 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.
[13] 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
[14] 남재우, 오준태, 김규식,“리니어모터의 매개변수 추정과 근사화의 오차분석,” *전자공학회 논문지*, 49권 SC편 4호, pp.61-68, 2012.

저 자 소 개

오 준 태
1998년 동국대학교 전기공학과 학사 졸업.
2003년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업.
2011년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사 졸업.
<주관심분야 : 센서네크워크, 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 전자전기컴퓨터공학부 교수
2003년～2005년 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수(Visiting Scholar)
<주관심분야 : 센서네크워크, 비선형제어, 에너지 변환>