

## 선형 압축기 구동시스템 특성에 관한 연구

안정렬\*, 전태원\*, 이흥희\*, 김홍근\*\*, 노의철\*\*\*  
울산대학교 전기전자정보시스템공학부\*, 경북대학교 전자전기공학부\*\*,  
부경대학교 전기공학과\*\*\*

### A study on the characteristics of linear compressor drive systems

J.R. Ahn\*, T.W. Chun\*, H.H. Lee\*, H.G. Kim\*\*, and E.C. Nho\*\*\*

Dept. of Electrical Eng., Univ. of Ulsan\*, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Kyungbook\*\*,  
Dept. of Electrical Eng., Univ. of Pukyong\*\*\*

#### ABSTRACT

A reciprocating compressor with a rotary motor used in a refrigerator has low efficiency, because it has the large mechanical losses due to the crank mechanism. The linear compressor which has the free piston driven by a linear motor, was developed to increase the efficiency of compressor by reducing mechanical losses. The TRIAC has been widely used for controlling the piston, because it has simple structure. However, as it is able to control only stator voltage, it is very difficult to obtain good efficiency. Recently, PWM inverter which is able to control the voltage as well as the frequency, is applied to linear compressor drive system to overcome above problem.

In this paper, the variations for efficiency and power factor of linear compressor are investigated by changing both the mechanical resonant frequency and electrical resonant frequency of linear compressor, and also the inverter frequency. The optimum relationships between both resonant frequencies and the inverter frequency is derived in order to obtain the maximum efficiency and also good power factor.

#### 1. 서 론

냉동·공조기기에서 압축기의 역할은 증발기에서 나온 뜨거운 기체상태의 냉매를 압축하여 비교적 높은 온도에서 쉽게 액체가 될 수 있도록 하고 냉

매에 힘을 주어 계속적인 순환이 가능하도록 해주는 것이다.

기존의 회전형 압축기는 회전운동을 크랭크 샤프트 메커니즘에 의해 왕복운동으로 바꿔주기 때문에 기계적인 마찰이 발생하여 효율이 떨어지고 소음 및 수명도 짧다는 문제점이 있다. 반면 선형 압축기는 프리 피스톤 구조로 되어있어서 운동변화에 따른 베어링 부 및 슬라이딩부에 나타나는 마찰 저항을 대폭 줄였고 크랭크 샤프트에 의해 발생하는 측면하중도 없앨 수 있으며 시스템상의 부하나 주위온도에 따라 스트로크 조절이 자유롭기 때문에 냉동·공조기기에 적용 시 소비전력 저감에 큰 효과가 있다. 냉동·공조기기의 전체 소비전력에서 압축기가 차지하는 소비전력이 80% 이상을 차지하므로 압축기의 효율은 아주 중요한 문제이다. 이런 특성으로 인해 선형 모터는 오일 없는 압축기로 많이 개발되어지고 있다.<sup>[1,2,3,4]</sup>

지금까지 선형압축기의 스트로크(stroke) 제어를 위하여 전력회로 및 제어회로가 단순하다는 장점 때문에 트라이악(triac)으로 교류전압의 크기를 제어하는 방식을 많이 사용하여 왔다. 이 방식은 전압의 크기만을 제어하고 주파수를 변화시킬 수 없으므로 선형압축기의 효율을 향상시키는데 한계가 있다. 또한 이 트라이악의 출력전압 및 전류 파형에 왜곡이 많으므로 이 전압 및 전류로 계산하는 스트로크 값에 오차가 있을 수 있다는 문제도 있다. 근래에서는 선형압축기의 스트로크를 제어를 위하여 크기 및 주파수까지 변경시킬 수 있으며, 전압 및 전류 파형이 거의 정현파인 PWM인버터를 사용하는 방식이 점차 사용되고 있다. 그런데 인버터 주파수와 선형압축기의 기계적 공진주파수 및 전기적 공진주파수의 관계에 따라 선형압축기의 특성 변화를 분석하는 연구가 상당히 미흡한 실

정이다.<sup>[5]</sup>

본 논문에서는 선형압축기의 스트로크제어를 위하여 PWM인버터를 사용 시, 인버터 주파수와 선형압축기의 기계적 공진주파수 및 전기적 공진주파수의 변화에 대하여 압축기의 효율 및 역율 등의 변화를 관측한다. 이 결과를 바탕으로 선형 압축기가 최대효율 및 고역율로 동작하기 위하여 최적의 인버터 주파수와 2개의 공진주파수의 관계를 도출한다.

## 2. 선형 압축기의 구조, 동작원리 및 특성

### 2.1 선형압축기의 구조 및 동작원리

선형압축기는 그림 1과 같이 크게 나누어 코일, 영구자석, 피스톤, 실린더, 토출밸브, 흡입밸브, 스프링 등으로 구성된다. 피스톤 끝부분에 있는 흡입밸브를 통하여 냉매를 흡입시키고 이 냉매를 압축한 후 토출밸브로 냉매를 방출시킨다.

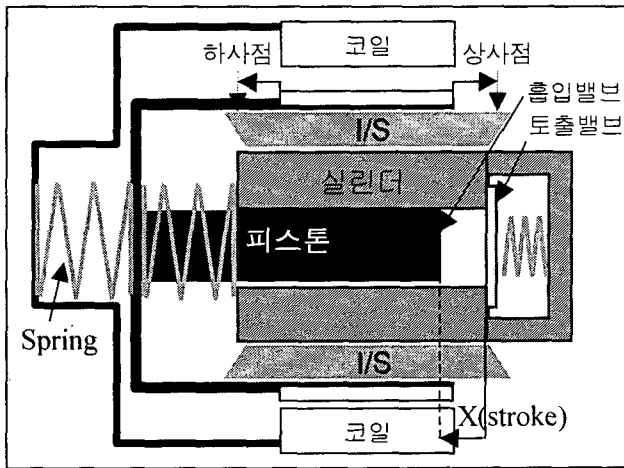


그림 1 선형 압축기 구조  
Fig.1 Structure of linear compressor

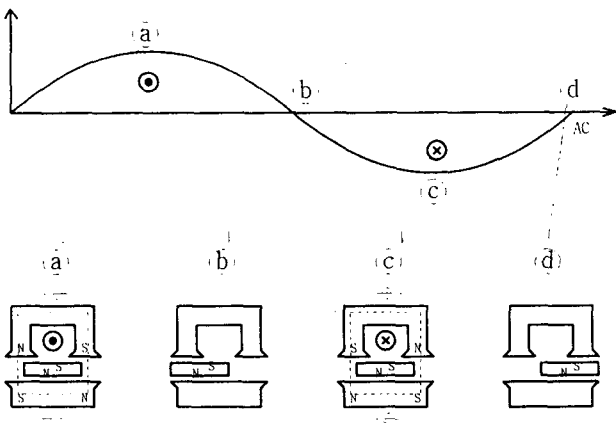


그림 2 선형 압축기 동작원리  
Fig. 2 Operating principle of linear compressor

여기서 코일에 전압을 인가하면 전류가 흐르게 되고 이 전류에 의해 자기장을 유발시킨다. 이 자기장은 피스톤에 고정되어있는 영구자석과 상호작용으로 힘을 발생시키고 이 힘으로 피스톤의 왕복운동을 하게 된다.

그림 2는 전류와 피스톤의 왕복운동관계를 그린 것이다. 전류가 최대일 경우 (㉔점) 외측 고정자는 N-S극, 내측 고정자는 S-N극이 되어 피스톤이 왼쪽방향으로 이동하며, 전류가 음의 방향으로 최대일 경우 (㉓점) 외측 고정자는 S-N, 내측 고정자는 N-S극이 되어 피스톤이 오른쪽방향으로 이동한다. 한편 전류가 0이 될 때에는 (㉒) 와 (㉑)점) 외측 및 내측 고정자에 자기장이 형성되지 않아 피스톤이 정지상태에 있다.

### 2.2 선형압축기의 기계적 방정식

그림 1로부터 식 (1)과 같은 기계방정식이 유도된다.<sup>[6]</sup>

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + C \frac{dX}{dt} + KX = \alpha i_s \quad (1)$$

여기서

$M$  : 피스톤 Moving Mass

$C$  : 점성계수

$K$  : 스프링 상수 (=  $K_M + K_{GAS}$ )

$K_M$  : 기계적 스프링 상수

$K_{GAS}$  : 가스 스프링 상수

$\alpha$  : 전동기 상수

$i_s$  : 전동기입력전류

$X$  : 피스톤 스트로크

위의 식에서  $K_{GAS}$ 는 단위 변위당 가스힘의 변화이다. 이 값은 스트로크와 부하상태에 따라 항상 변화되므로 항상 일정한 상수 값이 아니다.

### 2.3 센서리스 스트로크 계산 방법

그림 3은 선형 전동기를 권선저항 및 인덕턴스와 역기전력으로 표시한 등가회로를 보인 것이다.

여기서, 역기전력  $E = av$ ,  $v$ 는 피스톤의 속도이며, 역기전력은 피스톤 속도에 비례한다. 이 등가회로를 이용한 선형전동기 전압방정식은 다음 식과 같다.

$$V_m = L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s + av \quad (2)$$

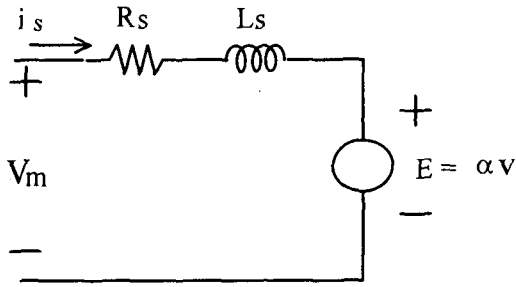


그림 3 선형 전동기의 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit of linear motor

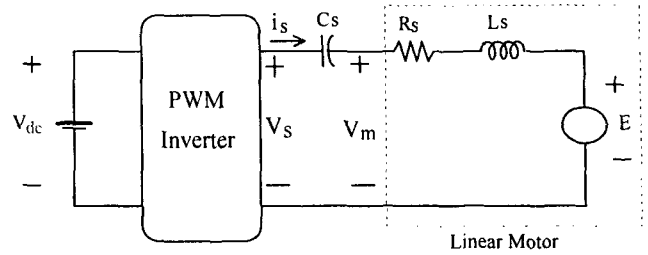


그림 4 PWM인버터와 선형 압축기  
Fig. 4 PWM inverter and linear compressor

식 (2)에서 피스톤 속도 식은 다음과 같이 유도된다.

$$v = \frac{1}{\alpha} (V_m - L_s \frac{di_s}{dt} - R_s i_s) \quad (3)$$

스트로크는 식 (4)과 같이 피스톤 속도를 적분하여 구할 수 있다.

$$X = \int v dt \quad (4)$$

식 (4)와 (3)에서 보면 다른 센서 없이 전동기 입력전압 및 전류값 만으로 스트로크를 계산할 수 있는 센서리스 제어가 가능하다. 그런데 전압 및 전류의 측정오차와 함께 온도의 변화 또는 자속의 포화 등에 의하여 전동기 상수인 저항 및 인덕턴스가 변화되므로 스트로크의 계산에 오차가 발생된다. 또한 적분기를 사용하므로 전압 및 전류에 약간의 직류성분이 포함될 경우 이 직류 성분이 계속 누적되므로 스트로크 값이 발산될 가능성도 있다.

### 3. 인버터 주파수와 기계적, 전기적 공진주파수 변화에 대한 선형 압축기 특성 분석

PWM인버터로 선형압축기의 스트로크 제어시 PWM인버터 주파수와 선형압축기의 기계적 공진주파수 및 전기적 공진주파수 비의 변화에 대한 압축기의 주요특성 특히 효율 및 역율의 변화를 관측한다.

그림 4는 선형압축기의 PWM인버터 구동장치의 등가회로를 그린 것이다. PWM인버터와 선형압축기 사이에 커패시터 Cs를 연결하여 선형압축기 내의 인덕턴스에 의한 유도성 무효전력을 보상하고자 한다.

그림 4에서 커패시터까지 포함한 인버터 출력전압 방정식은 식 (5)와 같다.

$$V_s = L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s + \frac{1}{C_s} \int i_s dt + \alpha v \quad (5)$$

이 식을 주파수영역으로 변환시키면 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= \left[ R_s + j(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}) \right] \bar{i}_s + \alpha \bar{v} \\ &= \bar{Z}_e \bar{i}_s + \alpha \bar{v} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$\bar{Z}_e = R_s + jX_s = R_s + j\omega L_s \left[ 1 - \left( \frac{\omega_{er}}{\omega} \right)^2 \right] \quad (7)$$

전기적 공진주파수  $\omega_{er}$ 와 인버터 주파수에 대한 전기적 공진주파수의 비  $\omega_{err}$ 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\omega_{er} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}, \quad \omega_{err} = \frac{\omega_{er}}{\omega} \quad (8)$$

한편 식(1)에서 스트로크 대신 피스톤 속도로 표시한 후, 주파수영역으로 변환시키면 식(9)과 같이 유도된다.

$$\left[ C + j(M\omega - \frac{K}{\omega}) \right] \bar{v} = \bar{Z}_m \bar{v} = \alpha \bar{i}_s \quad (9)$$

여기서

$$\bar{Z}_m = C + jX_m = C + j\omega M \left[ 1 - \left( \frac{\omega_{mr}}{\omega} \right)^2 \right] \quad (10)$$

기계적 공진주파수  $\omega_{mr}$ 와 인버터주파수에 대한 기계적 공진주파수의 비  $\omega_{mrr}$ 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\omega_{mr} = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad \omega_{mrr} = \frac{\omega_{mr}}{\omega} \quad (11)$$

식 (9)식 전류식을 식 (6)에 대입하여, 인버터 출력전압을 피스톤속도의 함수로 정리하면 다음 식과 같이 유도된다..

$$\overline{V}_s = \frac{1}{\alpha} \overline{Z}_e \overline{Z}_m \overline{v} + \alpha \overline{v} = \overline{Z}_{em} \overline{v} + \alpha \overline{v} \quad (12)$$

여기서, 임피던스  $Z_{em}$ 의 크기와 위상차는 식 (13)과 같다.

$$|Z_{em}| = \frac{1}{\alpha} |Z_e| |Z_m|, \quad \phi_{em} = \phi_e + \phi_m \quad (13)$$

위의 식을 사용하여 인버터 출력전압의 피크치  $V_{sp}$ 와 피스톤 속도에 대한 인버터 출력전압의 위상차  $\phi_{sp}$ 의 식은 다음과 같이 유도된다.

$$V_{sp} = V_p \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (14)$$

$$\phi_{sp} = \tan^{-1}(a_2/a_1) \quad (15)$$

여기서,

$$a_1 = |Z_{em}| \cos \phi_{em} + \alpha \quad (16)$$

$$a_2 = |Z_{em}| \sin \phi_{em}$$

$V_p$ 는 피스톤 속도피크치 이다.

한편, 식 (9)에서 전동기 입력전류의 피크치  $I_{sp}$ 는 다음 식과 같이 유도된다.

$$I_{sp} = \frac{|Z_m|}{\alpha} V_p \quad (17)$$

그림 5는 피스톤 스트로크 및 속도에 대하여 인버터 출력전압 및 전류의 위상도를 그린 것이다.

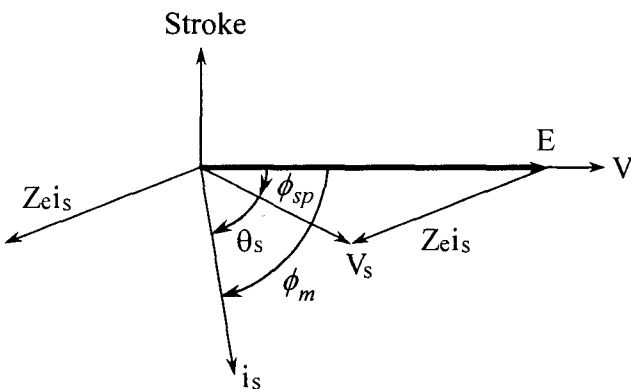


그림 5 인버터 출력전압 및 전류의 위상도

Fig.5 Phase diagram for output voltage of PWM inverter and current

피스톤 속도와 전동기의 역기전력은 동상이며 스트로크는 속도에 대하여  $90^\circ$  지연된다. 위의 위상도를 이용하여 선형압축기 입력전력  $P_{input}$  및 출력전력  $P_{out}$  식은 각각 다음과 같다.

$$P_{input} = \frac{V_{sp}}{\sqrt{2}} \frac{I_{sp}}{\sqrt{2}} \cos(\theta_s) \quad (18)$$

$$P_{out} = \alpha \frac{V_p}{\sqrt{2}} \frac{I_{sp}}{\sqrt{2}} \cos(\phi_m) \quad (19)$$

여기서, 출력전압과 전류 위상차  $\theta_s = \phi_m - \phi_{sp}$ 이다.

식 (18)과 (19)식으로 선형압축기의 효율 및 역율은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{input}} \times 100(\%) \quad (20)$$

$$pf = \cos(\theta_s) \quad (21)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

위에서 유도된 식을 사용하여 인버터주파수에 대하여 기계적 공진주파수 및 전기적 공진주파수의 값이 변화되었을 경우, 선형압축기의 효율 및 역율의 변화를 시뮬레이션을 통하여 관측한다.

즉, 인버터 주파수에 대한 기계적 공진주파수의 비  $\omega_{mrr}$ 을 0.8~1.25의 범위로 변화시키면서, 인버터 주파수에 대한 전기적 공진주파수의 비  $\omega_{err}$ 가 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2일 경우, 각각 입력전력, 출력전력, 효율, 위상차, 역율 등을 계산하였다.

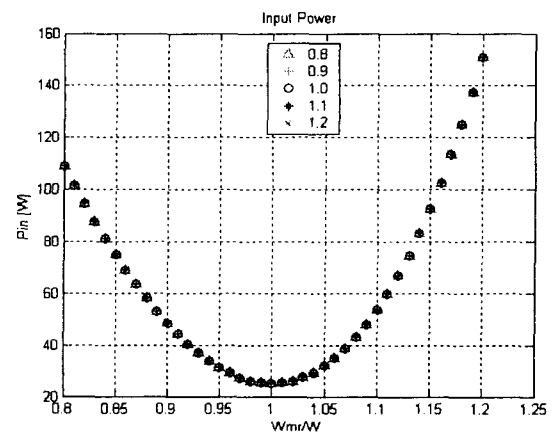


그림 6 선형압축기의 입력 전력

Fig. 6 Input power of linear compressor

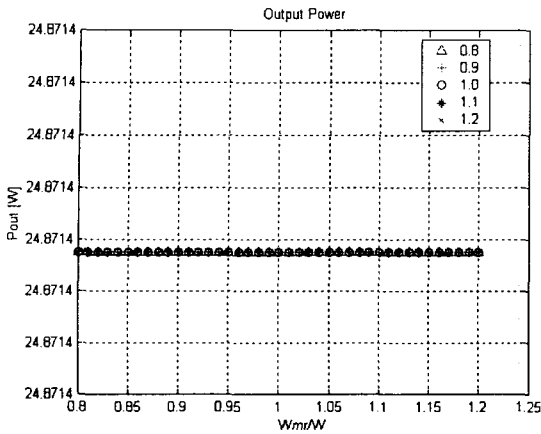


그림 7 선형압축기의 입력 전력  
Fig. 7 Input power of linear compressor

그림 6과 그림 7은 각각 선형압축기의 입력전력 및 출력전력의 변화를 보인 것이다. 입력전력은 전기적 공진주파수 변화에 거의 영향이 없다. 그러나, 기계적 공진주파수는 인버터 주파수와 동일할 경우에는 입력전력이 최소가 되고, 인버터 주파수보다 기계적공진주파수가 더 크거나 작을 경우에는 입력전력이 증가된다. 그리고, 그림 7에서 보는 바와 같이 출력전력은 두개의 공진 주파수에 관계없이 항상 일정하다.

그림 8은 선형압축기의 효율의 변화를 보인 것이다. 기계적 공진주파수가 인버터 주파수와 동일할 경우에는 효율이 거의 100[%] 가까이 된다. 또한 인버터 주파수에 대하여 기계적 시정수가 더 증가할수록 효율이 계속 감소되며, 반대로 기계적 시정수가 더 감소될수록 효율이 계속 감소됨을 알 수 있다. 전기적 공진주파수 변화에 대하여 효율은 입력전력과 같이 거의 영향을 받지 않는다.

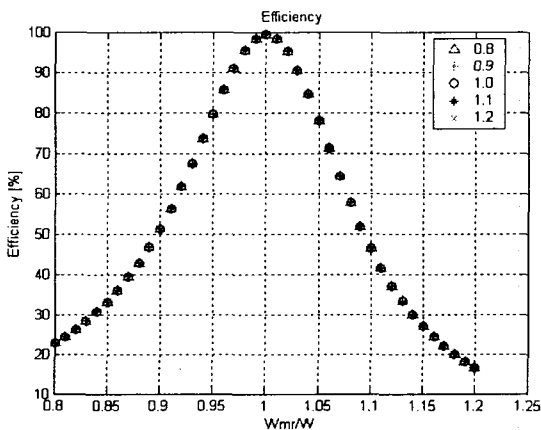


그림 8 선형압축기의 효율  
Fig. 8 Efficiency of linear compressor

그림 9는 인버터 출력전압과 전류의 위상차 변화

를 보인 것이다. 인버터 주파수에 대하여 기계적 공진 주파수가 작을 경우, 전류가 전압보다 위상이 앞서며 전기적 공진 주파수가 증가될수록 이 위상차가 줄어든다. 그리고 인버터 주파수에 대하여 기계적 공진 주파수가 클 경우, 전압이 전류보다 위상이 앞서며 전기적 공진 주파수가 증가될수록 위상차가 더 커진다. 기계적 공진 주파수와 인버터 주파수가 같을 경우에는 전기적 공진주파수와 관계없이 위상차가 거의 0이 된다.

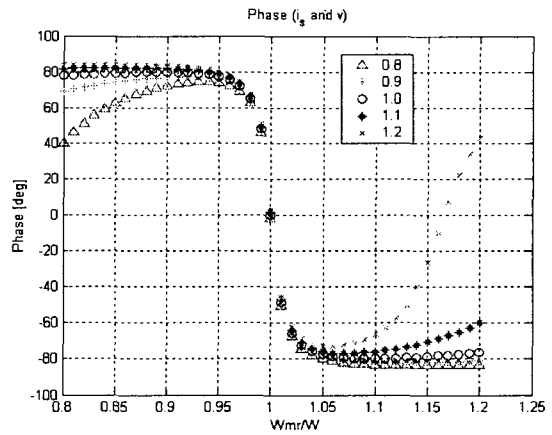


그림 9 출력전압 및 전류의 위상차  
Fig. 9 Phase difference between output voltage and current

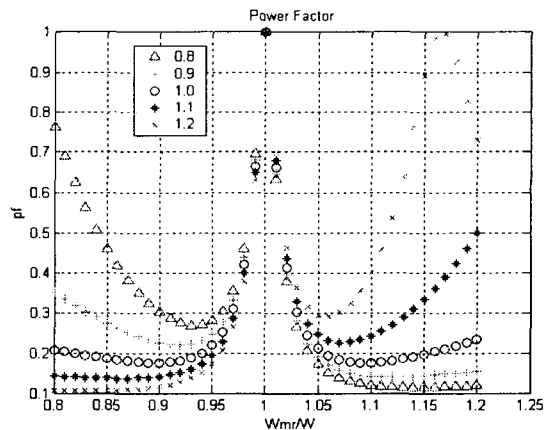


그림 10 선형압축기의 역율  
Fig. 10 Power factor of linear compressor

그림 10은 인버터 출력전압과 전류의 위상차를 이용하여 계산한 역율의 변화를 보인 것이다. 인버터 주파수와 기계적 공진주파수가 같을 경우에는 역율이 거의 1이 된다. 기계적 공진주파수가 더 클 경우에는 이 공진주파수가 증가할수록 역율이 급격히 감소되다가 다시 증가된다. 기계적 공진주파수가 더 작을 경우에도 이 공진주파수가 감소함에 따라 역율이 급격히 감소되다가 다시 증가된다.

전기적 공진주파수의 영향을 보면, 기계적 공진 주파수가 인버터 주파수보다 더 클 경우에는 전기적 공진주파수가 증가할수록 역율이 좋아지고, 기계적 공진주파수가 더 작을 경우에는 전기적 공진 주파수가 증가할수록 반대로 역율이 더 나빠진다.

## 6. 결 론

본 논문은 PWM인버터로 선형 압축기의 피스톤 스트로크 제어 시, 인버터의 주파수와 선형압축기의 기계적 공진주파수 및 전기적 공진주파수가 변화될 경우에 대하여 압축기의 효율 및 역율의 특성변화를 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 압축기의 효율은 기계적 공진주파수와 인버터 주파수가 같을 경우 최대효율이 발생되며, 기계적 공진주파수가 작거나 클 경우에는 효율이 상당히 감소되었다. 그리고 전기적 공진주파수는 효율에 거의 영향을 없음을 알 수 있다.

(2) 압축기 역율은 기계적 공진주파수와 인버터 주파수의 비에 많은 영향을 받는다. 인버터 주파수가 기계적 공진 주파수와 동일할 경우 역율이 거의 1이 되고, 기계적 공진주파수가 더 낮을 경우와 높을 경우에는 역율이 나빠지는 경향이 있다. 그리고 전기적 공진주파수의 변화에도 역율이 다소 영향을 받는다.

현재 최대 효율과 높은 역율로 선형압축기를 동작시키기 위하여, 인버터 주파수를 기계적 공진주파수에 맞추어 제어하는 기법에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 산업자원부원 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임. (과제관리번호 : 00-약-01)

## 참 고 문 헌

- [1] M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Analysis for Sensorless Linear Compressor using Linear Pulse Motor", in Conf. Rec. of IEEE-IAS, No. 4, pp. 2298-2304, 1999.
- [2] N. Seki, *Refrigeration and Air Conditioning Engineering*, Morikita Publishing Co., pp. 91-98, 1990.
- [3] N.R. Walt, R. Unger, "The Simulation and Design of a High Efficiency Lubricant Free, Linear Compressor for a Domestic Refrigerator", Proc. of International Compressor Engineering Conference, Vol. 1, pp. 1-9, 1992.
- [4] Y. Takeda, M. Sanada, S. Morimoto, T. Hirasa, and K. Taniguchi, "Cylindrical Linear Pulse Motors with Interior Permanent Magnet Mover", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 30, pp. 141-145, Jan./Feb. 1994.
- [5] Y. Yamakawa, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Basic Examination of Linear Compressor by Linear Pulse Motor with Spring Resonant", National Conventional Record of IEE Japan, No. 11995, 1997.
- [6] Choe GS and Kim KJ, "Theoretical and Experimental Analysis of Nonlinear Dynamics in a Linear Compressor", Journal of Vibration & Acoustics, Transactions of the ASME, Vol. 124, No. 1, pp. 152-154, 2002.