

## 리니어 컴프레샤용 LOA의 스트로크 센서 없는 제어 방법

유재유, 이철웅, 이재춘, 황민규, 김정철  
엘지전자 디지털 어플라이언스 연구소

### The control method of LOA for a linear comprssor without a stroke sensor

Jae-Yoo Yoo, Chel-Woong Lee, Jae-Choon Lee, Min-Kyu Whang, Jung-Chul Kim  
Digital Appliance Lab., LG Electronics

#### ABSTRACT

In recent the energy efficiency of a refrigerator has been restricted extremely. A compressor consumes a great portion of input power in a refrigerator. So it is necessary to develop a more efficient compressor in these days. The existing reciprocating compressor need to a crank shaft to convert the rotating motion to the straight motion and is not efficient. But the linear compressor using mechanic resonance is efficient but need a drive instead of a crank shaft to control a position accurately. However it is impossible to apply a stroke sensor practically because of the internal circumstance of compressor. In this paper, A new sensorless stroke control method using the current and voltage of linear compressor is proposed.

#### 1. 서 론

냉장고 등에 사용되는 왕복동컴프레샤에 있어서 구동전동기로서 회전기 대신에 기계적 공진을 병용한 직접구동 리니어전동기를 사용하면 기계적 손실을 저감시켜 시스템 효율을 대폭 개선할 수 있다.

하지만 기존 회전형전동기의 경우 크랭크 샤프트 메카니즘에 의해 상사점,하사점의 변위는 기계적으로 결정되는데 반하여 리니어전동기의 경우 프리피스톤(Free piston) 메커니즘이므로 상사점,하사점의 위치제어 또는 피스톤의 스트로크(Stroke)제어가 필수 불가결하다. 그런데 컴프레샤 내부환경 및 가격 그리고 취부 구조상 기계적 위치 센서를 이용하여 제어하는 것은 사실상 응용가능 하지 않다. 따라서 본 논문에서는 스트로크 센서 없이 전

류와 전압을 이용하여 계산한 스트로크(또는 속도)와 전류의 위상차를 이용하여 상사점을 정확히 제어하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 리니어 컴프레샤는 피스톤 Mass(M), Spring 상수(K) 공진을 이용한 시스템으로써, Gas Spring의 영향으로 상사점 부근에서 Spring 상수값이 급변하게 되고 이로 인하여 속도(또는 스트로크)와 전류의 위상차도 변곡점이 발생하게 되는데 이를 검출하여 이용하면 상사점 제어가 용이하게 되며 시스템 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 시스템간 편차를 완전히 제거할 수 있는 장점이 있다.<sup>1</sup>

#### 2. 본 문

##### 2.1 리니어 컴프레샤 동작원리

리니어 컴프레샤는 그림1에서 알 수 있듯이 크게 코일, 자석, 피스톤, 실린더, 토출밸브, 흡입밸브, 스프링 등으로 구성되며 피스톤 끝단에 있는 흡입밸브를 통하여 냉매를 흡입하고 압축한 후 토출밸브를 통하여 냉매를 내보내는 역할을 한다. 먼저 코일에 전압을 인가하면 전류가 흐르게 되고 이는 자기장을 유발시킨다. 이 자기장은 피스톤에 고정되어 있는 자석과 상호작용으로 힘을 발생시키고 이 힘으로 피스톤이 왕복운동을 하게 된다. 다시 말하면 전류양을 조절하여 피스톤의 왕복 행정 거리를 제어할 수 있고 이로써 냉매의 압축양 조절이 가능하다.

그림 1로부터 얻은 기계식은 식 (1)과 같다.

$$M \cdot \frac{d}{dt} \frac{dX}{dt} + C \cdot \frac{dX}{dt} + K \cdot X = a \cdot i \quad \text{식 (1)}$$

여기서

M : 피스톤 Moving Mass

C : 점성 계수

$K$  : 스프링 상수 (=  $K_M + K_{GAS}$ )

$K_M$  : 기계적 스프링 상수

$K_{GAS}$  : 가스 스프링 상수

$\alpha$  : 전기적 힘을 기계적 힘으로 바꿔주는 모터 상수

$i$  : 모터 인가 전류

$X$  : 피스톤의 행정 거리 (=  $\int Velocity dt$ )

$$Velocity = V_M - R * i - L * \frac{di}{dt} \quad \text{식 (2)}$$

여기서

$Velocity$  : 피스톤 속도

$V_M$  : 모터 양단 전압

$i$  : 모터 유입 전류

$R$  : 모터 저항

$L$  : 모터 인덕턴스

$$X = \frac{1}{\alpha} \int Velocity dt \quad \text{식 (3)}$$

여기서

$X$  : 피스톤 행정 거리

$\alpha$  : 전기적 힘을 기계적 힘으로 바꿔주는 모터 상수

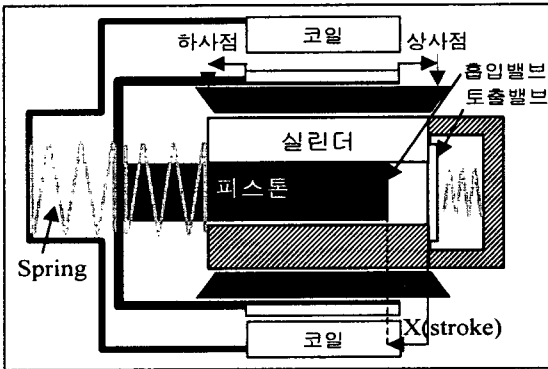


그림1 리니어 컴프레샤의 개략도  
Fig.1 The outline diagram of linear compressor

식 (1)에서  $K_{GAS}$ 는 단위 변위당 가스 힘의 변화로서 스트로크에 따라 변하는 스프링 상수값을 의미한다. 이 값은 정확히 말하면 스트로크와 부하에 따라 항상 변하기 때문에 상수값이 아닌 변수값이다.

식 (1)에서 알 수 있듯이  $M, K$  공진이 될 경우  $M$ 과  $K$ 에 의한 손실 성분이 없게 되어 작은 전류에도 큰 스트로크가 나오고 그 만큼 시스템 효율이 증가하게 된다. 또한 모터에 인가되는 전류와 피스톤의 속도는 동상이 되고 크기는 선형적인 비례관계가 된다.

## 2. 센서리스 스트로크 계산 방법

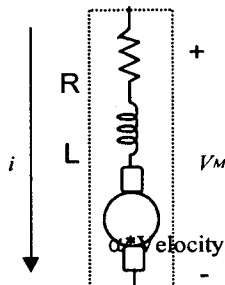


그림2 리니어 모터 구성도  
Fig. 2 Configuration of linear motor

그림 2의 리니어 모터 구성도로부터 전기식 식 (2)<sup>[2]</sup>와 식(3)<sup>[2]</sup>을 얻을 수 있다. 여기서  $\alpha * Velocity$ 는 역기전력을 의미하며 모터 전압과 전류 그리고 모터 상수를 이용하면 별도의 센서없이 스트로크를 계산할 수 있음을 알 수 있다.

여기서 스트로크 정보를 알기 위해서는 필연적으로 모터 전압과 전류 검출 회로와 모터 상수 데이터가 필요하다.

그런데 회로 부품 편차는 전압, 전류 검출 편차를 야기시키고 이는 스트로크 계산에 영향을 미친다. 모터 상수도 마찬가지로 일정한 산포를 가질 것이고 이 산포로 인하여 스트로크 계산에 오차를 유발시키게 된다. 다시말하면 이 방법으로 계산할 경우 필연적으로 스트로크 오차가 존재하게 된다.

그런데 그림 3에서 알 수 있듯이 컴프레샤 효율은 상사점을 기점으로 급격하게 감소한다. 뿐만아니라 상사점보다 큰 스트로크로 운전하게 되면 컴프레샤 신뢰성에도 문제가 발생할 수 있다. 즉 컴프레샤 효율과 신뢰성 측면에서 볼 때 정밀한 상사점 제어는 필수적이다.

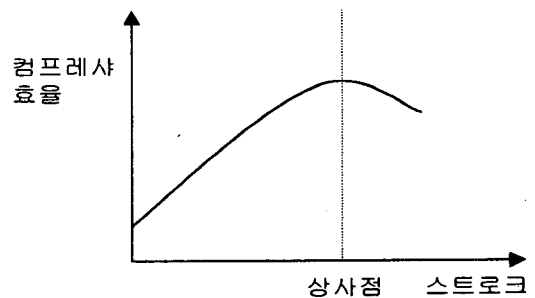


그림3 스트로크에 따른 컴프레샤 효율  
Fig.3 Compressor efficiency to stroke

## 3. 스트로크와 $K_{GAS}$ 및 스트로크, 전류 위상차의 상관관계

### 3.1 스트로크와 $K_{GAS}$ 의 상관관계

일반적으로 상사점에 도달하기 전까지는 스트로크가 증가하면 변위당 가스 힘의 변화가 감소하게 되어  $K_{GAS}$ 도 같이 감소하게 되고 상사점보다 큰 스트로크에서는 이와 반대로 스트로크가 증가함에 따라  $K_{GAS}$ 도 증가한다. 즉 상사점 근처에서  $K_{GAS}$  값은 급변하게 되

어 변곡점이 발생하게 된다. 이는 외부 부하에 따라 변화량이 바뀌게 되는데 일반적으로 부하가 작을 경우  $K_{GAS}$ 의 변화는 작고 부하가 클수록 크다. 다소 복잡하지만 묘사 함수법<sup>[1]</sup>을 이용하면 스트로크에 따른  $K_{GAS}$ 의 변화 특성을 검증할 수 있다. 그림 4는 특정 부하에서 스트로크에 대한  $K_{GAS}$ 의 시뮬레이션 결과이다.

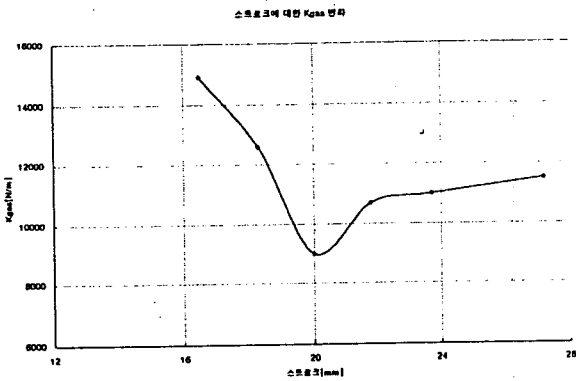


그림 4 스트로크에 따른 Kgas 변화  
Fig.4 The variation of Kgas to stroke

### 3.2 $K_{GAS}$ 와 스트로크, 전류 위상차와 상관관계

식 (1)을 Laplace Transform을 취해보면 식 (4)와 같이 된다.

$$\frac{I(S)}{X(S)} = \frac{M \cdot S^2 + C \cdot S + K}{\alpha} \quad \text{식 (4)}$$

여기서  $S = j\omega$ ,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ,  $f =$  운전주파수

식 (4)으로부터 전류, 스트로크의 위상차는 식 (5)와 같이 계산될 수 있다.

$$\tan(\theta_{i,x}) = \frac{\omega \cdot C}{K - M \cdot \omega^2} \quad \text{식 (5)}$$

여기서  $\theta_{i,x}$ : 전류, 스트로크 위상차

$K$ : 스프링 상수 ( $= K_M + K_{GAS}$ )

식 (5)에서 알수 있듯이  $M, K_M, C, \omega$  이 일정한 값을 가질 경우  $\theta_{i,x}$  와  $K_{GAS}$  는 반비례 관계가 성립함을 알 수 있다.

### 3.3 스트로크와 전류, 스트로크 위상차의 상관관계

앞에서 알아본 바와 같이  $K_{GAS}$ 와 전류, 스트로크 위상차는 반비례 관계가 성립한다. 그러면  $K_{GAS}$ 가 변곡점이 발생하는 스트로크에서  $\theta_{i,x}$  역시 변곡점이 발생하게 된다. 시뮬레이션 및 시험 결과는 그림 5와 그림 6과 같다.

그림 5와 그림 6에서 스트로크 20[mm]는 상사점을 의

미한다. 즉 상사점에서  $K_{GAS}$ 와 마찬가지로 전류, 속도 (또는 스트로크)의 위상차 변곡점이 발생함을 알 수 있다. 여기서 Ps는 흡입압이며 Pd는 토출압을 의미한다. Ps는 대기압으로 일정하고 Pd는 가변되는데 값이 클수록 부하가 큰 상태라고 보면 된다. 부하가 클수록 전류, 스트로크 위상차 절대값이 크고 변곡점이 뚜렷하게 발생함을 알 수 있고 부하가 작을수록 전류, 스트로크 위상차 절대값이 작으며 변곡점이 완만하게 발생함을 알 수 있다.

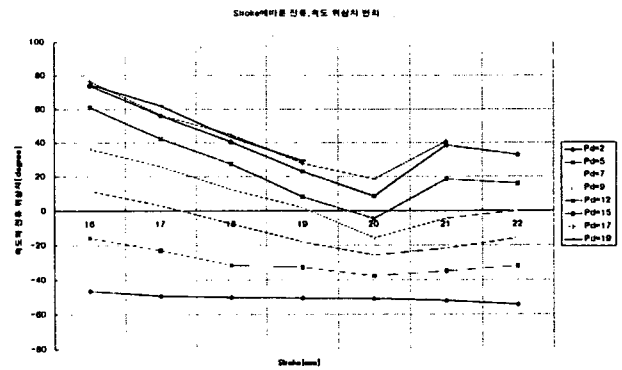


그림5 스트로크에 따른 전류, 속도 위상차 [시뮬레이션 결과]  
Fig.5 The phase difference between current and velocity to stroke

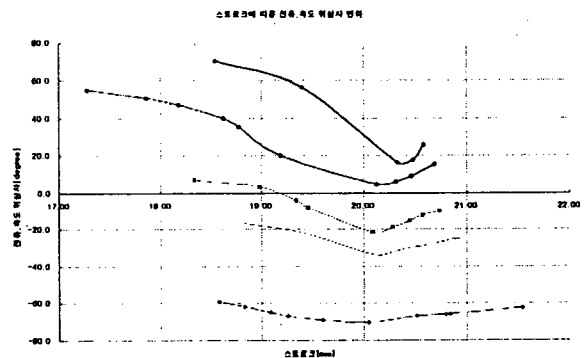


그림6 스트로크에 따른 전류, 속도 위상차 [시험 결과]  
Fig.6 The phase difference between current and velocity to stroke

## 4. 센서리스 스트로크 제어 방법

앞에서 센서없이 모터 전압과 전류를 이용하여 계산된 스트로크 정보만으로는 정밀한 상사점 제어가 어렵다는 것을 알 수 있었고 또한 전류, 스트로크 위상차 정보를 이용하면 정확하게 상사점을 검출할 수 있다는 것 역시 알아 봤다. 여기서는 그림 7과 같이 이 두 정보를 이용하여 어떠한 부하 조건에서도 안정적이고 효율적으로 운전하는 새로운 제어 알고리즘을 제안한다.

그림 7은 크게 두부분으로 구분된다. 하나는 전류와 스트로크 위상차를 이용하여 스트로크 지령치를 결정하는 부분이고 또 하나는 결정된 스트로크 지령치와 계산된 스트로크와 비교하여 컴프레샤 입력을 결정하는 부분

이다. 전체적으로 다시 설명하자면 다음과 같다.

모터 전압과 전류를 검출하고 모터 상수를 이용하여 먼저 스트로크를 계산하고 이 스트로크와 검출된 전류의 위상차를 계산한다. 이 위상차의 절대값으로 위상차 변곡점이 뚜렷하게 나타나는 부하 조건인지 완만한 부하조건인지 판별한다. 위상차 변곡점이 확연히 나타나는 조건에서는 스트로크 지령치를 서서히 증가시키면서 변곡점이 발생할 때 스트로크 지령치를 저장하고 그 지령치로 운전되도록 계산된 스트로크 정보를 피드백하여 제어한다. 위상차 변곡점이 완만한 조건에서는 부하가 작은 조건이므로 냉동능력이 부족하지 않을 정도의 상사점보다 작은 일정 스트로크로 제어한다. 여기서 피드백 되는 스트로크는 모터 전압과 전류로 계산한 값으로 실제 약간의 오차를 가지고 있다. 하지만 부하가 작은 조건이므로 실제로 필요한 냉동 능력도 작아서 약간의 오차가 존재해도 성능이나 신뢰성 측면에서 전혀 문제 되지 않는다.

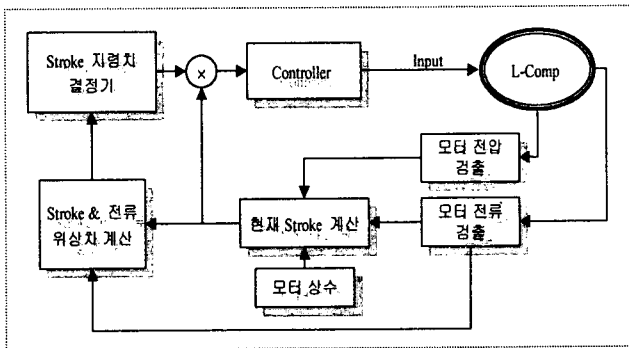


그림7 스트로크 제어 블록도  
Fig.7 Stroke control block diagram

### 3. 결 론

기계적 공진을 이용한 리니어전동기는 기존 회전형 전동기 방식의 기계적 손실을 저감시킬 수 있어 시스템 효율을 개선시킬 수 있으나 프리피스톤 메커니즘 특성상 상사점 및 하사점을 정밀하게 제어해줄 드라이브가 별도로 필요하다. 그런데 컴프레샤 내부환경 및 가격 그리고 취부 구조상 기계적 위치 센서를 이용하여 제어하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이런 여러 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 스트로크 센서 없이 전류와 전압을 이용하여 계산한 스트로크(또는 속도)와 전류의 위상차를 이용하여 상사점을 정확히 제어하는 새로운 방법을 제안하였다. 스트로크와 부하에 따른 리니어컴프레샤의 가스 스프링 특성을 이용하여 전류와 스트로크 위상차 변곡점을 검출하고 이를 이용하여 제어함으로써 정밀한 상사점 제어가 가능하였다. 이로써 컴프레샤 효율을 극대화시킬 수 있었을 뿐만아니라 시스템간 편차를 완전히 제거할 수 있었고 센서를 사용함으로써 발생했던 가격 및 취부문제를 해결할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 최규상, "전동형 진동식 압축기의 동적 해석", 한국과학기술원 박사학위 논문, 1999
- [2] Robert W.Redlich, "Method and apparatus for measuring piston position in free piston compressor", 특허출원No 282631, 1994, July