

Line Start 形 리니어 압축기

홍 언표* · 박 경배** · 최 기철** · 이 형국**

Line Start Linear Compressor without Stroke Controller

Eon-Pyo Hong*, Kyeong-Bae Park**, Ki-Chul Choi**, Hyeong-Kook Lee**

Stroke(선형운동거리), *TDC*(상사점), *a*(모터 상수), *Rac*(모터 AC 저항), *L*(모터 인덕턴스), *C*(운전 커패시터), *M*(가동자 질량), *Km*(스프링 상수), *Kg*(부하 스프링 상수), *EER*(압축기 효율 지수)

ABSTRACT

LG Electronics developed linear compressors for a household refrigerator which can reduce energy consumption up to 24 % by only Drop-In instead of a conventional reciprocating compressor. The linear compressor is composed of a linear oscillating motor, a piston directly coupled with the linear motor, a cylinder and the specific discharge system of LG. Because of this free-piston structure, the position of the piston can be changeable according to the voltage variation, load variation and so on. By this reason, LG linear compressor has been in need of an additional unit to control the position of the free-piston stably.

In this paper we will introduce the innovative technology which is able to operate the linear compressor without controlling the piston position like a conventional reciprocating compressor.

1. 서론

가정 전체 소비 전력의 20 ~ 40 % 는 냉장고에서 소비되며, 냉장고 소비 전력의 대부분은 압축기에서 소비되어진다. 에너지 절약에 대한 세계적인 관심 증대와 각 국의 에너지 소비 규제는 점점 강화되고 있다. 이런 시장 변화는 압축기 개발 업체들로 하여금 압축기 소비 전력을 저감하기 위한 기술 개발 경쟁을 부추기고 있는 실정이다.

특히, LG전자가 세계 최초로 개발하여 양산하고 있는 리니어 압축기(Fig. 1)는 리니어 모터의 선형 운동을 직접 피스톤에 전달하여 마찰 손실을 저감하였을 뿐만 아니라 스프링을 사용하여 부하 공진 운전을 가

능케 함에 의해 고효율 특성을 갖는다.(1, 2, 3) 냉장고에 장착되어 있는 기존 Reciprocating 압축기를 단 순히 LG 리니어 압축기로 교체함에 의해 24 % 이상의 소비 전력이 저감됨을 확인하였다.(2, 6) 그러나 이런 우수성에도 불구하고 피스톤의 Stroke 가 기구적으로 제한되지 않는 구조를 가지기 때문에 입력 전압 변동이나 부하 변동 등에 의해 Stroke 가 변동되는 단점을 가지게 된다. 이와 같은 Stroke 변동을 일정하게 제어하기 위해서 우리는 현재 Sensor-less 방식의 TDC 제어를 하고 있다. 상기의 방식은 리니어 모터의 전압 방정식으로부터 피스톤의 위치 정보를 얻을 수 있으며 리니어 모터 설계 변수들이 운전 영역 안에서 변하지 않는 특성을 가지기 때문에 가능하다.(4, 5)

제어 장치를 사용함에 의한 장점들은 다음과 같다.

- Soft starting에 의한 기동 소음 감소
- 전압 및 부하 변동에 대한 stroke 안정 운전
- Stroke 가변에 의한 용량 가변

* LG Electronics Digital Appliance Laboratory

** LG Electronics Digital Appliance Laboratory

E-mail : ephong@lge.com

그러나 기존 압축기에서 필요치 않은 제어 장치가 있음에 의해 부가적인 제어 손실 증가와 가격 상승, 제어 변수의 선형성을 확보하기 위해 리니어 모터가 출력대비 크게 설계되어야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 냉장고용 기존 Reciprocating 압축기 처럼 Stroke 제어 장치가 없이 운전되는 리니어 압축기에 대한 연구와 실험 결과를 소개하고자 하며 주요 연구 과제는 다음과 같다.

- 기동순간 Stroke 저감 방법 개발
- 전압/부하 변동에도 안정된 특성을 가질 것
- 설계 인자 변동에 대한 압축기 신뢰성 확보

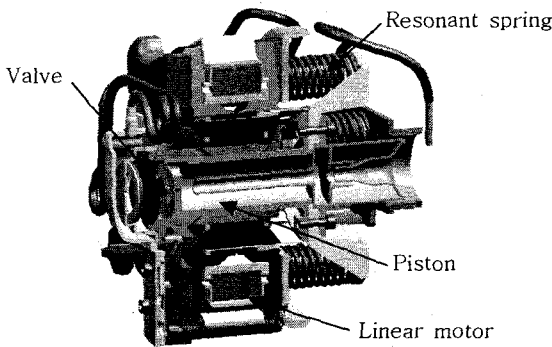


Fig. 1 Structure of the developed linear compressor

2. 기존 Sensor-less Stroke Control

앞에서 언급하였듯이 리니어 압축기(이하 리니어)는 리니어 모터의 직선 왕복 운동을 피스톤에 직접 전달하여 냉매를 압축하는 장치이며 이때 피스톤의 Stroke는 전압 변동 또는 부하 변동에 의해 변동될 수 있는 구조이다. 이러한 변동은 리니어가 냉장고에 장착되어 운전될 때 우리가 원하지 않는 결과를 가져올 수 있기 때문에 지금까지 Microprocessor와 TRIAC(반도체 스위칭 소자) 등으로 구성된 전압 제어 장치를 통하여 리니어의 Stroke를 제어하여 왔다.

Stroke 제어 방법을 간략하게 소개하면 제어 회로는 Fig. 2와 같이 구성되어지며 리니어 모터 양단의 전압과 전류를 검출한 후, Microprocessor에서 이미 알고 있는 리니어 모터의 설계 변수들과 전압 방정식으로부터 구해진 수식 1로부터 운전 Stroke를 계산한 후, TRIAC의 스위칭 시점을 제어함에 의해 전압을 가변 하여 Stroke를 제어한다.

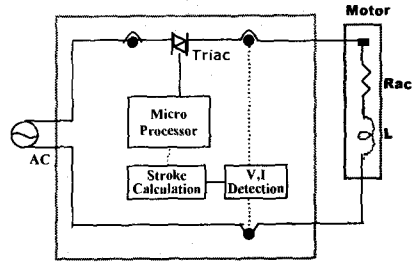


Fig. 2 Sensor-less stroke controller

$$stroke = \frac{1}{\alpha} \int (V - R_{ac}i - L \frac{di}{dt}) dt \quad (1)$$

α : motor constant [N/A, V • sec/ml,
 R_{ac} : AC resistance [Ω], L : Inductance [H]

3. Line start linear compressor 개발

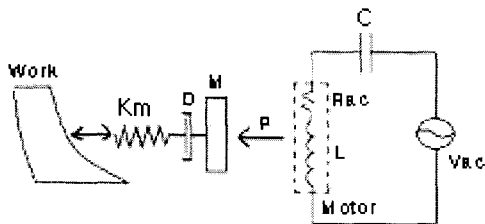
리니어에서 Stroke 제어 장치의 역할이 중요함을 앞에서 소개하였다. 그러나 Stroke 제어 장치가 있음에 의해 부가적인 제어 손실이 발생하고 제품 가격이 상승하는 등의 단점을 가지게 된다. 이런 이유로 우리는 기존 Reciprocating 압축기처럼 제어기 없이 전원만 인가하면 일정 Stroke를 안정되게 운전하는 압축기를 연구하게 되었다. 많은 아이디어와 실험을 통하여 기동순간 급증하는 Stroke 저감 방법 및 전압 변동과 부하 변동에 둔감한 특성을 갖는 압축기를 연구, 개발하였으며 냉장고에 장착하여 성능과 신뢰성을 확인하였다.

3.1 기동 신뢰성 확보

리니어는 피스톤의 Stroke가 기구적으로 구속되지 않고 입력 전압의 크기에 비례하여 운전되는 구조로써 Fig. 3의 리니어 해석 모델에서 볼 수 있듯이 효율적인 운전을 위하여 전기적으로 L, C 공진, 기구적으로 압축 냉매의 Gas spring(이하 Kg)을 고려한 M, K(“Km+Kg”를 의미) 공진이 되도록 구성되어 있다. 그래서 어떠한 안전장치 없이 상용 전원(220V)이 직접 인가되어지면 Stroke의 순간적인 급증으로 인하여 기구 신뢰성에 치명적인 결과가 야기될 수 있다.

이런 문제를 해결하고자 우리는 전원이 인가되는 순간 전기적 임피던스를 증가시키는 시도를 하였다. 이 방법은 기존의 Reciprocating 압축기의 기동 회로에

사용되는 회로 절환용 반도체 소자인 PTC(Positive Temperature Coefficient)를 Fig. 4 와 같이 커패시터와 병렬로 연결하여 전원이 처음 인가되는 순간 전류가 PTC 쪽 회로를 통하여 리니어로 흐르게 하고 PTC 저항이 온도 상승으로 급격히 증가하면 자연스럽게 커패시터 쪽 회로를 통하여 흐르게 하였다. 그리고 더욱 신뢰성 있는 기동 특성을 얻기 위해 PTC 와 직렬로 리액터를 추가하였다. Fig. 4 는 기동 회로를 나타내며 Fig. 5 와 Fig. 6 은 PTC 만 있을 때와 리액터를 추가하였을 때의 기동 Stroke를 보여주는 실험 결과이다. 리액터를 추가하였을 때 기동 Stroke 가 더욱 감소됨을 알 수 있다.



Km : Mechanical spring constant, D : Damping coefficient, M : Moving mass, P : Motor power, C : Running capacitor

Fig. 3 Analysis model of the linear compressor

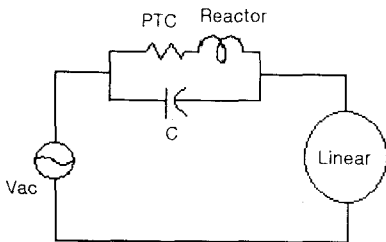


Fig. 4 Starting circuit for the line start linear compressor

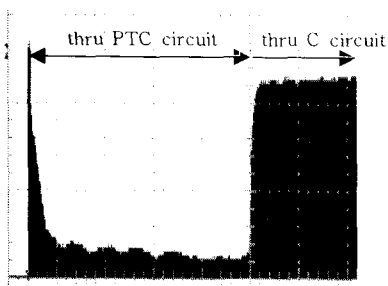


Fig. 5 Stroke characteristics in case of PTC-starting

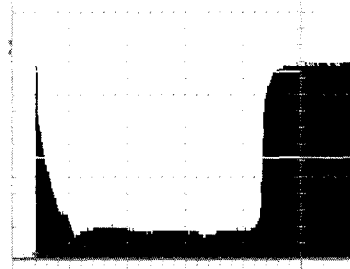


Fig. 6 In case of adding a reactor

3.2 전압 변동에 대한 대응

리니어의 경우 인가되는 전압에 비례하여 Stroke 가 증감되는 특징을 가진다고 서두에서 언급하였다. Stroke 제어가 없는 경우 전압 변동은 Stroke 에 그대로 전달되고 리니어의 냉력(Cooling capacity) 변화를 초래하여 결국 냉장고 성능에 악영향을 끼치게 된다. 특히 냉력 부족으로 인한 약냉이나 냉각 불량량의 경우 문제는 더욱 심각해진다.

Table 1 Domestic voltage variation in seasons

계절	최소[V]	최대[V]	평균[V]	3σ[V]	표본[회]
봄	170	283	220.6	201~240	29761
여름	174	291	219.7	198~241	39963
가을	180	289	220.4	202~239	42144
겨울	175	275	221.2	204~239	46910

* 1996년 품질센터 조사 자료

표 1 은 품질센터에서 1996년에 조사한 계절별 전국 전압 변동 자료이다. 대략 3σ 범위가 200 V ~ 240 V로써 국내 99.7 % 의 가정이 이 범위 내에 전압을 공급 받는다고 볼 수 있다. 이러한 국내 전압 상황을 고려하여 Stroke 의 변동 량을 최소화 할 수 있는 기술 개발이 본 압축기에 요구되어진다.

이를 해결하고자, 우리는 먼저 압축기가 정상적인 운전을 꼭 해야 하는 전압 변동 구간을 표 1의 자료와 우리가 실측한 자료 및 한전의 전압 관리 상황을 참고로 하여 대략 5σ 수준인 220V ± 15 % (범위 내에 99.99994 % 가 포함됨)로 목표를 설정하였다. 그리고 이 구간을 몇 개의 작은 구간으로 나눈 후 모터 권선

을 다단으로 설계하여 각 전압 구간에 대응하도록 하였다. Fig. 7 (a)에 상기 방법을 구현한 Mode 전환 회로와 리니어 모터 권선 형태를 간략히 나타내었다. 동작을 살펴보면, (a) 그림에서 Drive 는 입력 전압을 검출하여 Microprocessor 에서 그 크기를 판단한 후, Relay를 스위칭 하여 적합한 모터 권선에 전압이 인가 되도록 하며 Mode 전환은 (b) 그림에 나타내어진 전압에서 이루어지도록 하였으며, 운전 Mode 사이엔 Hysteresis 영역을 두어 Relay 오동작을 방지하였다.

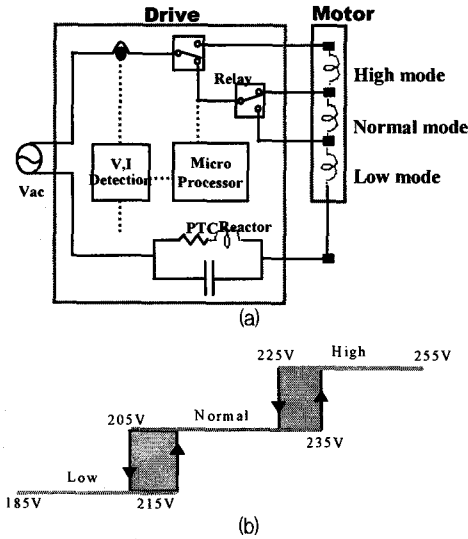


Fig. 7 (a) Drive unit and (b) Designed switching voltage

3.3 부하 변동에 대한 대응

부하 변동이란 내/외부적인 온도 변화로 인해 냉장고 Cycle 내에 발생하는 온도 변화에 의해 압축기에 유입되는 냉매 유량 변동 및 압축기 부하인 흡입/토출 압력의 변동을 말한다. 예를 들면, 냉장고 주위 온도 변화, 냉장고 On/Off 운전 중 Cycle 이 정상 상태(냉장고 내부 온도가 목표 온도에 도달한 상태)에 이르기까지의 변화 등을 말할 수 있겠다. 이러한 Cycle 내 온도 변화로 인한 압력 변동은 압축기 피스톤에 직접 영향을 미치기 때문에 리니어의 경우 안정적인 성능을 유지하기 위한 대책이 필요하다. Fig. 8 은 리니어 냉장고 실험동안 전류와 피스톤 속도의 위상차(phase difference)를 측정된 것으로 Kg 의 변동을 알 수 있다 (수식 3). Kg 는 주위 온도에 비례하고, Cycle 이 정상 상태로 접근할수록 감소한다는 것을 보여 준다.

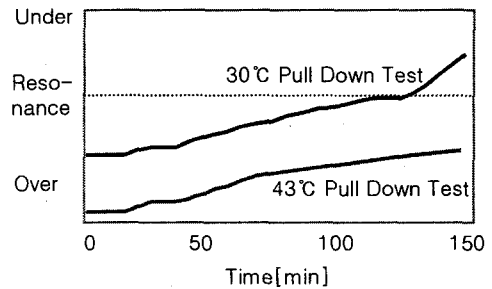
이러한 부하 변동 특성에 대응하고자, 우리는 기구적으로 Kg 변동에 민감하도록 Km 을 증가시켜 가동자 질량을 기준에 비해 20 % 무겁게 하였다. 또한 리니어 지배 방정식 수식 2, 3 의 수치해석과 실험을 통하여 L, C 설계에 따라 부하 변동에 대한 Stroke 변화가 Fig. 9 와 같은 특성을 가짐을 알게 되었으며 이를 본 논문의 리니어 설계에 응용하였다.

Fig. 10, 11 은 이러한 특성을 이용하여 설계된 리니어의 냉장고 실험 결과이다. Fig. 10 은 43°C Pull Down 실험(냉장고가 특정 온도의 평형 상태에서 정상 상태에 이를 때까지 압축기를 운전하는 실험)결과로써 압력 변화에도 Stroke 가 안정되게 유지되고 있음을 보여 준다. Fig. 11 은 주위 온도 변화에 따른 Stroke 와 TDC 측정 결과로써 온도가 높아지면 Stroke 가 증가하고 낮아지면 감소하여 부하에 비례하여 냉력이 가변되는 특성을 보여 준다.

$$V = Raci + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})i + \alpha v \quad (2)$$

$$\alpha i = (D + C_w)v + j\{\omega M - \frac{(K_m + K_g)}{\omega}\}v \quad (3)$$

w : Frequency [Hz], v : Velocity [m/sec],
Cw : Effective load [N • sec/m]



$$\text{Under : } \{\omega M - \frac{(K_m + K_g)}{\omega}\} > 0, \text{ Over : } \{\omega M - \frac{(K_m + K_g)}{\omega}\} < 0$$

Fig. 8 Phase difference variation between current and velocity

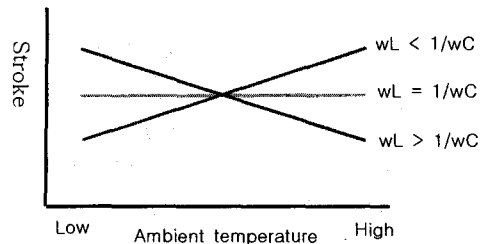


Fig. 9 Stroke variation as to the electrical parameter matching

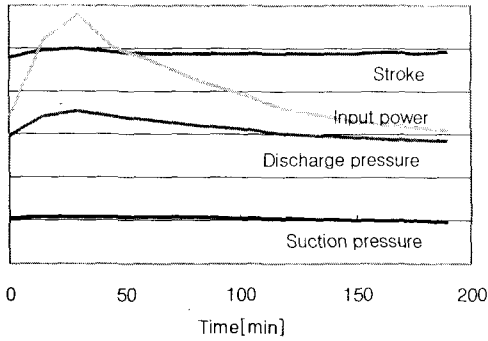


Fig. 10 43°C Pull Down test results of the line start-linear compressor

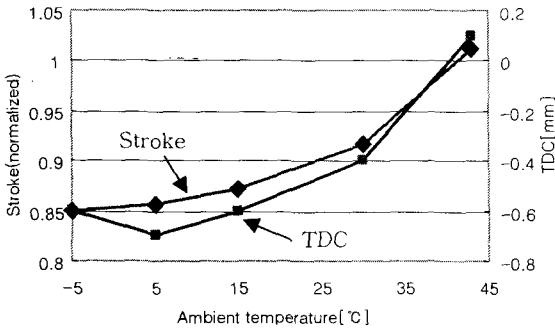


Fig. 11 Stroke & TDC characteristics according to the ambient temperature around refrigerator

3.4 설계 인자 변동에 대한 고찰

지금까지 Stroke 제어가 없는 리니어의 설계에 있어서 외부적 변동에 대한 해결 방법을 소개하였다. 이 절에서는 내부적 변동인 설계 인자의 변동까지 고려한 Stroke 변화 수준을 6σ 설계 기법을 사용하여 분석한 결과를 간략히 소개하고자 한다.

리니어 설계에 있어서 Stroke 에 영향을 미치는 중요한 인자들은 Vac, α, Rac, L, C, M, K 등이다. 이들 인자들의 확률적 분포는 Monte Carlo 통계 기법을 이용하여 구할 수 있으며 정확한 결과 예측을 위하여 인자들의 공정 데이터를 사용하였다. 물론 정밀한 예측을 위해서는 Monte Carlo simulation 횟수가 충분히 많을수록 좋지만 본 논문에서는 10⁴ cycle 결과를 제시하겠다. 구해진 확률 분포 인자들을 리니어 지배 방정식에 삽입하여 계산함에 의해 Fig. 12 에 나타난 바와 같이 Stroke 의 변동 분포를 예측할 수 있었고 6σ Stroke 범위(범위를 벗어날 확률이 3.4 ppm 을 의미)는 대략 0.975 ~ 1.024 (normalized stroke) 수준임을

알 수 있었다. Fig. 13 는 Stroke 가 6σ 범위에서 변동될 때 냉력 및 EER의 변동 특성을 실험한 결과로서 냉력은 최대 3.7 %, EER 은 최대 1.4 % 변함을 보여준다.

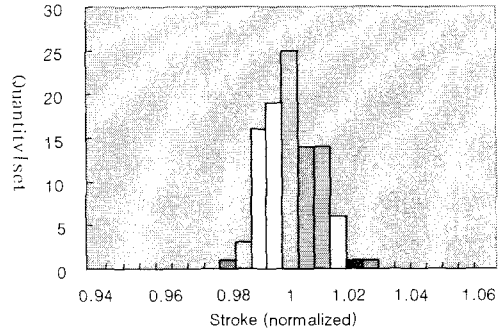


Fig. 12 Predicted stroke distribution by 6σ method

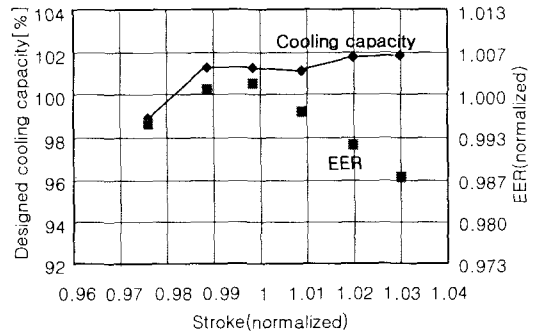


Fig. 13 Performance according to the stroke variation : Calorimeter test result

4. 결론

피스톤 Stroke 가 기구적으로 구속되지 않는 리니어 압축기는 Stroke 의 변동이 압축기의 성능 및 신뢰성과 밀접한 관계를 가지기 때문에 일정한 Stroke 를 유지하기 위하여 부가적인 제어 장치를 필요로 한다. 하지만, 부가적인 제어 장치로 인한 효율 감소 및 Cost 상승은 해결해야 할 과제였다.

본 논문에서는 Stroke 제어 장치가 없는 리니어 압축기 개발에 대한 연구 결과를 소개하였고 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- PTC, 리액터를 이용한 기동 방법 개발
- 저가의 Relay 구동 회로와 리니어 모터 권선 단단 설계를 통한 전압 변동 대응
- Gas spring 변동을 고려한 압축기 설계

-6 σ 분석을 통한 설계 결과 예측 및 신뢰성 검증

이상의 Line start 리니어 개발에 의해 기존 리니어 압축기 대비 4 % 의 EER 증가와 43 % 의 제어 장치 Cost 저감뿐만 아니라 모터 소형화도 가능하였다. 그리고 기존 Reciprocating 압축기처럼 어떤 냉장고에도 쉽게 장착될 수 있는 장점을 가지게 되어 리니어 대량 양산에 도움이 되리라 생각된다.

참고문헌

1. H. K. Lee, G.Y. Song, J.S. Park, E.P. Hong, W.H. Jung, K.B. Park, "Development of the Linear Compressor", Proceedings International Compressor Conference, 2000, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
2. G.Y. Song, H.K. Lee, J.Y. Yoo, J. K. Park, Y. H. Sung, "Development of the Linear Compressor for a Household Refrigerator", Appliance Manufacturer Conference & Expo, 2000, Cincinnati, USA
3. H-K Lee, J-T Heo, G-Y Song, K-B Park, S-Y Hyeon, Y-H Jeon, "Loss Analysis of Linear Compressor", International Conference on Compressors, I Mech E, 9-12 September, 2001, City University, London, UK
4. K.B. Heo, H.K. Lee, C.W. Lee, M.K. Hwang, J.Y. Yoo, Y.H. Jeon, "Control of Linear Compressor", International Conference on Compressors, I Mech E, 7-10 September, 2003, City University, London, UK
5. K.B Park, E.P. Hong, H.K. Lee, "Development of a Linear Motor ", Proceedings International Compressor Engineering Conference, 2002, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
6. J.W. Kim, J-T Heo, J.D. Kim, S.Y. Hyeon, Y-H Jeon, "Linear Compressor for Natural Refrigerant", International Conference on Compressors, I Mech E, 7-10 September, 2003, City University, London, UK