

밸브의 최적설계를 통한 고효율 왕복동식 압축기

- 고효율 토출밸브의 개발 -

°주재만*, 오상경*, 김귀권**, 김생호**

ABSTRACT

왕복동식 압축기에서 고효율 토출밸브를 개발하였다. 멈치개(stopper)가 있는 외팔보 형태의 토출 밸브는 밸브 및 멈치개의 형상과, 밸브와 멈치개 및 밸브시트에 존재하는 오일에 의한 점성력(sticky force) 등에 의한 밸브의 개폐과정과 동적 거동특성의 변화를 유발한다. 본 논문에서는 오일막에 의한 점성력을 측정하고, 그에 의하여 유발되는 지연시간(time-lag)을 측정할 수 있는 실험장치를 개발하였다. 또한, 토출밸브의 개폐 과정을 최적화하여, 과압축 손실을 최소화한 토출밸브계를 개발하였다. 개발된 밸브계에 대하여 실험적인 방법으로 그 효과를 검증하였다.

INTRODUCTION

냉장시스템에서의 압축기는 냉장사이클의 설계와 그 성능 등에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나이다. 최근까지 가정용 냉장시스템의 소비전력의 절감을 위해, 전 세계적으로 압축기의 고효율화가 지속적으로 연구 되어지고 있다. 가정용 냉장고에 널리 적용되고 있는 왕복동 압축기에서 흡입 및 토출밸브의 개폐시간은 압축기의 용적효율을 결정하는 매우 중요한 인자중의 하나이다.

특히 토출밸브는 실린더 내부의 가스 압축력과, 밸브자체의 정적 및 동적 강성, 그리고 밸브와 밸브시트(valve seat) 사이의 냉동유에 의한 점성력(sticky force) 등의 상호작용에 의해 열리게 되고, 그 과정에서 토출포트와 토출밸브의 리프트(lift)량에 의해 압축가스가 토출방으로 토출된다. 이 때 토출밸브의 토출량이 너무 작으면 토출가스의 토출 속도가 증가하며, 따라서 토출과정에서의 유동손실(hydraulic loss)이 증가하게 된다. 또한 토출밸브의 열림량이 어느 값 이상으로

크게 되면, 토출밸브계에 의한 유동 소음이 증가한다.

토출밸브가 열리는 시점이 늦어질수록 실린더 내부의 압력이 과대하게 상승하여 실린더 내부와 토출방의 압력차이가 커지게 되어 과압축 손실이 증가하게 된다. 실린더 내부와 토출방의 압력차가 토출밸브의 강성보다 커지게 되는 순간 토출밸브가 열리며 실린더의 압력이 낮아지게 된다. 또한 그 압력차가 토출밸브의 강성보다 작아지면서 열려있던 토출밸브가 닫히게 되는데 이때 토출밸브와 멈치개는 접촉되어 있으며 그 사이에 있는 오일에 의한 점성력이 작용하게 된다. 이 점성력이 클 경우 토출의 닫힘시간이 지연되어 실린더 내부에서 토출된 가스가 토출방으로부터 실린더 내부로 역류함으로써 용적효율의 저하를 초래한다.

외팔보(cantilever) 형태의 토출밸브는 밸브 자체의 형상과 고정부의 위치에 의하여 그 동적 특성이 결정 된다.

본 논문에서는, 왕복동식 압축기가 주어진 운

* 삼성전자 냉공조 사업부 선행연구그룹

** 삼성광주전자 압축기 개발 그룹

전조건에서 최적의 용적효율을 달성할 수 있도록 토출 밸브계에 작용하는 점성력을 예측하고, 점성력에 의한 토출밸브의 개폐시간의 차이를 고찰 하는데 초점을 맞추었다.

토출밸브와 멈치개에 작용하는 총점성력(total sticky force)

Fig. 1.에서 보듯이 토출밸브는 1 자유도의 mass-spring 계로 가정하고, 토출밸브와 멈치개 사이에 존재하는 오일에 의한 총점성력 F_s 는 무차원 반경(dimensionless radial distance) $\xi = r/R$ 이고 동점성계수(dynamic viscosity)가 μ 일 때, Reynold's Equation [Brooker, 1983, Khalifa and Liu, 1998]과 연속방정식으로부터 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_s &= \int_0^R 2\pi r(p - P_d)dr \\ &= \int_0^1 2\pi R^2 \xi(p - P_d)d\xi \\ &= -\frac{3\pi\mu}{2} R^4 \frac{1}{y^3} \frac{dy}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 보듯이 토출밸브와 멈치개 사이에 존재하는 오일에 의한 점성력은 접촉면적과 그 이격 거리(y)의 세제곱에 반비례함을 알 수 있다.

■ 실험 1. Measuring the Lift Force of a Discharge Valve with a Oil

토출밸브와 멈치개가 접촉하는 면적(R)과 그 이격 거리(y)를 변화시켜 점성력의 차이가 발생하는 지를 실험적으로 확인하였다. Fig. 2는 토출밸브계 나타낸 것이다. Fig. 2의 시료 (a)와 시료 (b)는 멈치개의 단면 형상이 서로 다른 두 경우를 나타내며, 시료 (a)는 토출밸브와 멈치개의 접촉면적이 시료 (b)의 20% 수준이다.

힘측정기(force gauge)를 이용하여 토출밸브의 열림힘(lift force)을 측정하였다. 토출밸브의 열림량이 어느 이상이 되어 멈치개와 토출밸브 사이

에 오일 막이 형성되면 점성력, F_{stick} ,가 발생되어 열림힘, F_{lift} ,는 식 (2)와 같이 된다. Fig. 3은 토출밸브의 열림량에 따른 열림힘을 나타낸다. Fig. 3에서 보듯이 멈치개와 토출밸브의 접촉 면적이 작은 Fig. 2의 시료 (a)가 시료 (b) 보다 열림힘이 크게 나타남을 알 수 있다.

$$F_{lift} = F_{spring} - F_{stick} \quad (2)$$

■ Experiment 2. Time-lag of a Discharge Valve with a Oil

토출밸브가 열렸을 때 토출밸브는 멈치개와 접촉하게 되고, 이 때 토출밸브와 멈치개 사이의 오일에 의한 점성력으로 인하여 토출밸브에 점성력이 작용한다. 따라서 토출밸브가 멈치개로부터 이탈되는데 시간지연이 발생하며, 이러한 토출밸브의 지연시간을 실험적으로 측정하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 토출밸브는 멈치개와 밸브판에 리벳으로 고정되어 있다. 멈치개와 리벳 및 토출밸브는 서로 절연된(전기적으로 분리된) 상태로 고정되어 있으며, 토출밸브를 멈치개에 접촉하게하는 전극봉(electrode)을 부가로 사용하였다. 또한 멈치개와 전극봉 및 밸브판에 Fig.4와 같이 구성된 전기장치를 적용하였다.

먼저, 전극봉으로 토출밸브를 멈치개에 접촉시키면 멈치개, 토출밸브 및 밸브판은 서로 통전된다. 순간적으로 전극봉을 이격시키면, 전극봉과 토출밸브가 전기적으로 단락되어 point ②와 point ③ 사이에 설정된 전위차가 발생한다. 전극봉이 이격된 후 토출밸브가 스프링력에 의해 멈치개에서 이탈되게 되면, point ①과 point ③ 사이에도 설정된 전위차가 발생하게 된다.

전극봉이 토출밸브에서 이격된 후, 멈치개와 토출밸브 사이에 존재하는 오일에 의한 점성력이 존재하면, point ②와 point ③에서의 전위차 발생시점으로부터 얼마간의 시간이 지연된 후 point ①과 point ③ 사이의 전위차가 발생된다. 이 전위차 발생시점의 차이인 Δt 가 곧 멈치개와 토출밸브 사이에 존재하는 오일의 점성력에 의한 시간지연량이다.

Fig. 5는 토출밸브와 멈치개 사이의 점성력에 의하여 유발된 시간지연(time-lag)의 일례이다. 일반적으로 오일의 점성력은 오일의 온도가 상승

됨에 따라 지수적으로 감소한다. Fig. 6은 Fig.2의 시료 (a)와 시료 (b)의 멍치개의 형상에 대한 온도에 따른 지연시간량을 나타낸 것이다. 그림 위쪽의 8msec에서 2msec까지 변화한 부분은 멍치개와 토출밸브의 접촉면적이 큰 시료 (b)를 적용한 경우의 지연시간이고, 아래쪽의 1msec내에서 변화한 부분은 접촉면적이 작은 시료 (a)를 적용한 경우의 지연시간량이다.

Fig. 6에서 보듯이 오일의 온도가 상승함에 따라 지연시간은 지수적으로 감소하며, 멍치개와 토출밸브의 접촉면적이 작은 시료 (a)를 적용한 경우가 시료 (b)를 적용한 경우보다 지연시간이 1/30 정도로 매우 작게 나타남을 알 수 있다.

■ Experiment 3. Measuring of a Suction and Discharge Valve Motions

정상적으로 운전(ASHRAE/T, refrigerant:R134-a)하고 있는 왕복동식 압축기에서의 흡입과 토출밸브의 거동을 측정하였다. Fig. 7은 피스톤이 왕복운동함에 따라 흡입 밸브가 열리게 되어 밸브판의 밸브시트에서 분리되고, 또한 닫히게 되어 밸브판에 접촉되는 현상으로부터 흡입 밸브의 거동(motion)을 알 수 있도록 실험장치를 고안하였다. 또한 토출밸브의 거동을 알아보기 위하여 gap sensor를 사용하였으며, 축에 고정된 encoder와 gap detector를 이용하여 피스톤의 위치를 동시에 측정하였다.

Fig. 8에서 보듯이 피스톤이 TDC(top dead center)에 있을 때 크랭크각을 0도로 설정하였으며, 단일 행정을 왕복운동 하는 동안의 각 밸브의 운동을 측정할 수 있다. Table 1은 피스톤이 한 행정을 움직이는 동안 시료 (a)와 시료 (b)에 대하여 토출밸브가 열려 있을 동안의 크랭크각을 나타낸다. Fig. 8과 Table 1에서 보듯이 멍치개와 토출밸브 사이에 존재하는 오일 막에 의한 점성력의 차이로 인해 압축기 운전중에 토출밸브의 거동이 변화함을 볼 수 있다. 특히 토출밸브와 멍치개 간의 점성력이 작은 시료 (a)의 경우에 피스톤의 한 행정 동안 토출밸브가 열려 있는 시간이 짧아 졌음을 알 수 있다.

■ Experiment 4. Measuring of a PV-Diagram

토출밸브와 멍치개사이의 점성력에의해 발생하는 지연시간으로 인한 압축기의 효율 변화를 확인하기 위해서 실린더 내부와 토출방의 압력을 측정하여 과압축 손실을 비교하였다. Fig. 9는 압축기를 정상적으로 운전(ASHRAE/T, refrigerant : R134-a)시켰을 경우의 지시선도(PV-diagram : Fig. 9-a)와 과압축 손실(Fig. 9-b)이다. PV-diagram에서 실린더의 압력이 토출방의 압력보다 높은 부분이 과압축이 발생하는 구간이 되며, 그 부분의 면적이 과압축 손실량이 된다. 과압축 손실량은 점성력에 의한 토출밸브 닫힘 지연시간이 긴 시료 (b)를 적용한 경우가 61.4[$\text{gkf} \cdot \text{cm}$], 지연시간이 짧은 시료 (a)를 적용한 경우가 59.8[$\text{gkf} \cdot \text{cm}$]로 적게 나타났다.

CONCLUSION

왕복동 압축기에서의 냉동유는 기구부의 윤활, 냉각 그리고 밀폐(sealing)의 역할을 하기 때문에 실린더 내부, 흡입밸브와 토출밸브계에 필연적으로 유입되게 된다. 토출밸브와 멍치개 사이에 존재하는 오일막(oil film)으로 인하여 발생하는 점성력은 토출밸브의 닫힘시간을 지연시키며 따라서 압축기의 효율저하를 초래한다. 토출밸브와 멍치개 사이에 존재하는 오일막에 의하여 발생하는 점성력과 그 결과로 나타나는 지연시간을 실험적으로 구하였으며, 밸브의 거동을 측정하여 점성력이 밸브거동에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과를 바탕으로 토출밸브와 멍치개 사이의 점성력을 최소화한 멍치개를 설계하여 압축기의 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Brooker, J. F., "Squeeze Films and Bearing Dynamics", *Handbook of Lubrication*, CRC Press, Boca Raton, 1983.
- [2] Khalifa H.E. and Liu, X., "Analysis of Stiction Effect on the Dynamics of Compressor Suction Valve", International Compressor Engineering Conference at Purdue, 1998.

[3] Ozu, M. and Itani, T., "Some Electrical Observations of Metallic Contact between Surfaces under Dynamic

Conditions of Rotary Compressor", International Compressor Engineering Conference at Purdue, 1980.

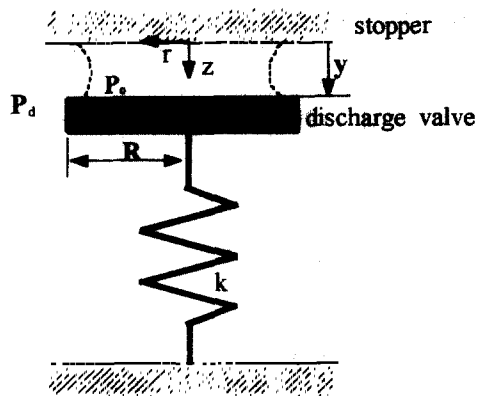


Fig. 1 Analytic Model of Discharge Valve System

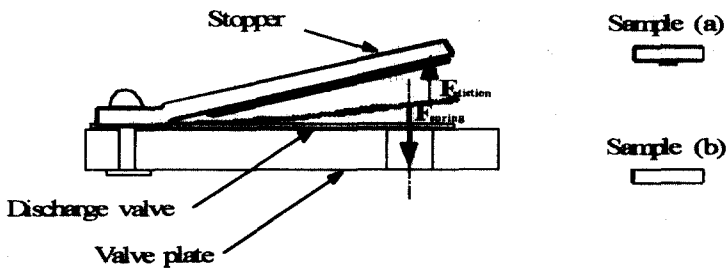


Fig. 2 Discharge Valve System Geometry

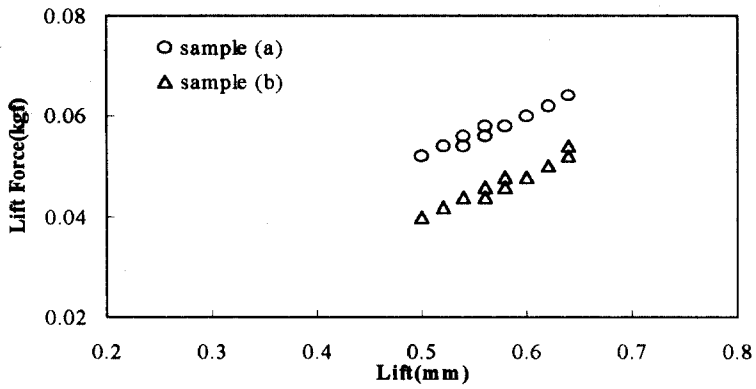


Fig. 3 Lift Force Acting on Discharge Valve and Stopper

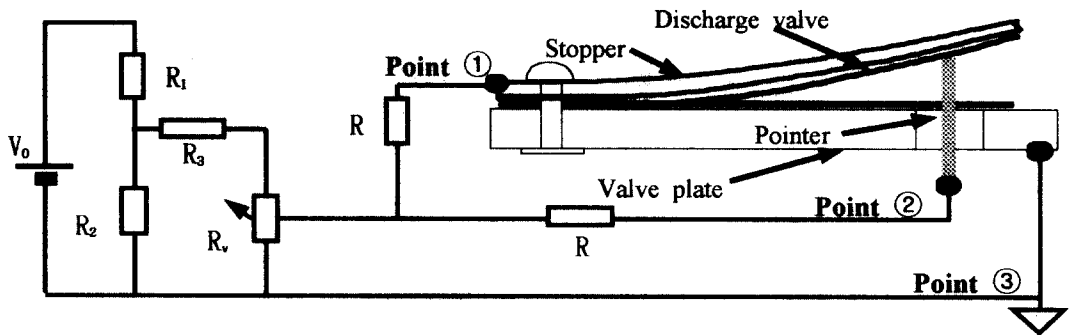


Fig. 4 Measuring System of a Time-lag by a Sticky Force

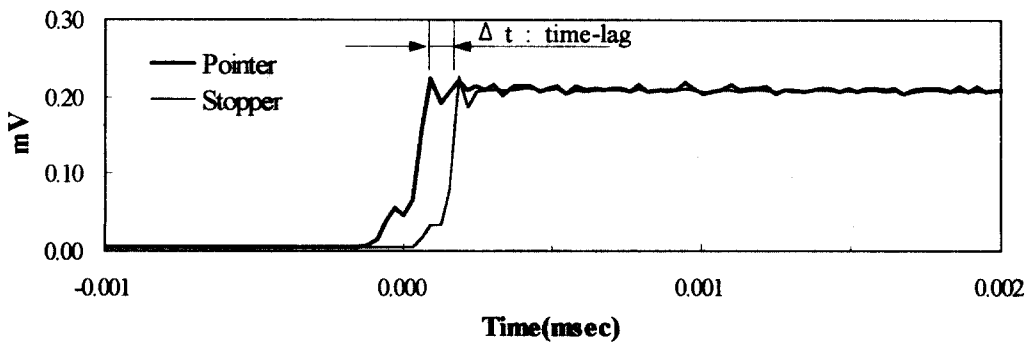


Fig. 5 Typical Time-lag Results from Sticky Force

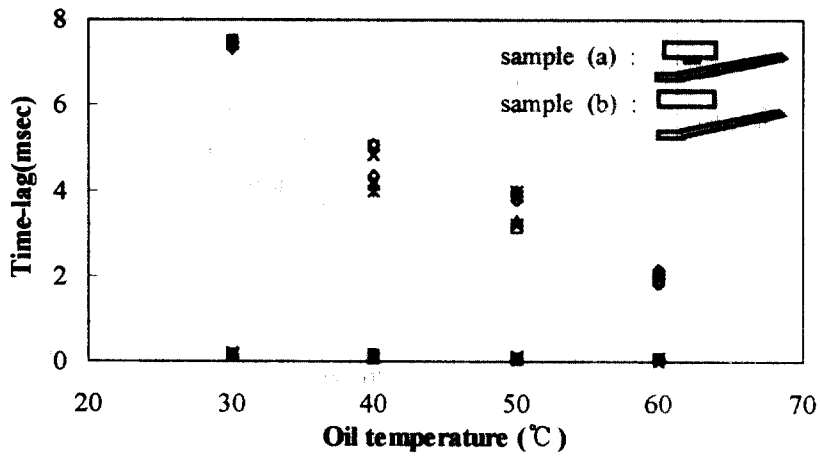
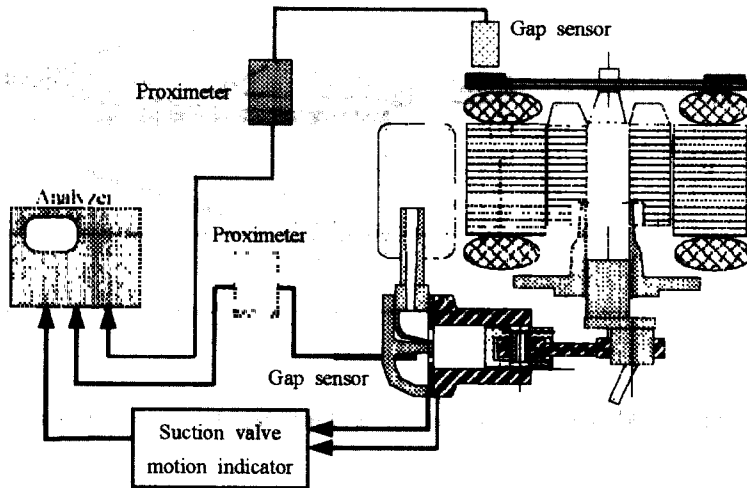
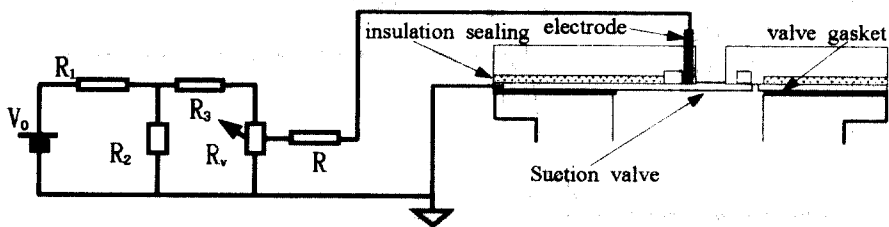


Fig. 6 Time-lag Results from Sticky Forces between Stopper and Discharge Valve



(a) Experimental Apparatus



(b) Suction Valve Motion Indicator

Fig. 7 Experimental Set up to Measure the Motion of Valves

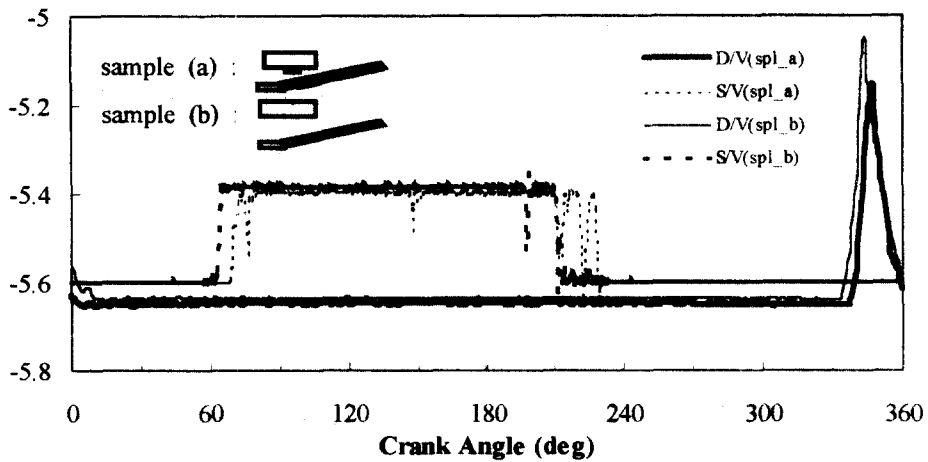
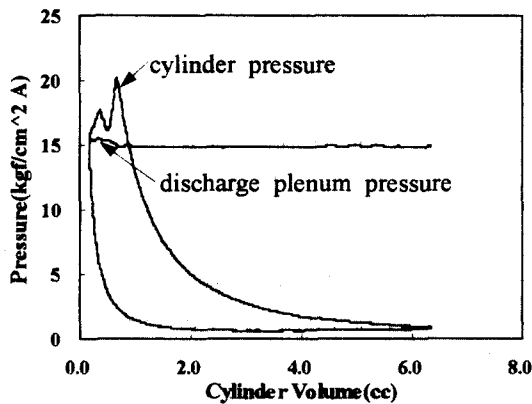


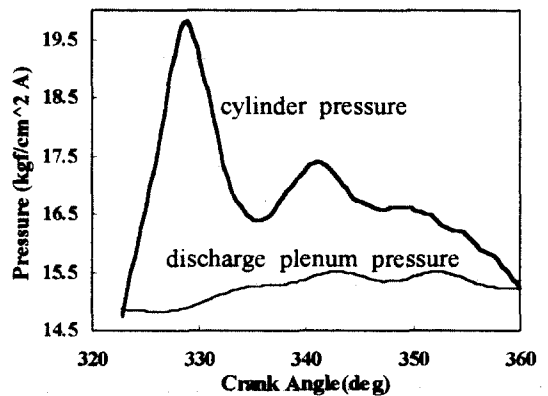
Fig. 8 Suction and Discharge Valve Motion in case of Sample (a) and Sample (b)
 dashed line : Motions of Suction Valves, solid lines : Motions of Discharge Valves

Table 1. Discharge Valve Opening Angle (degree)

	discharge valve		
	open angle(deg)	close angle(deg)	opening angle(deg)
Sample (a)	337.8	7.0	29.2
Sample (b)	333.5	13.9	40.4



(a)



(b)

Fig. 9 (a) : PV-diagram (b) : Over-compression Loss