

차량용 가변용량 압축기의 사판 거동에 관한 연구

이태진[†], 이건호^{*}

A Study on the Swash Plate Behavior of Variable Displacement Compressor for Automotive Air Conditioning System

Tae Jin Lee[†], Geon Ho Lee^{*}

Key Words : Automotive air-conditioning system(차량용 에어컨 시스템), Swash plate compressor(사판식 압축기), Variable displacement(가변용량), Piston inertia force(피스톤 관성력), Swash plate centrifugal force(사판 원심력), Control valve(제어밸브)

Abstract

Due to the distinct advantages of comfort, drive ability and fuel economy standard, the variable displacement swash plate type compressor which can control the compressor displacement by increasing or reducing the swash plate angle has been developed for automotive air-conditioning system. That can be obtained constant temperature of car room on the variation cooling capacities or engine speeds.

This paper was carried out the analysis of swash plate behavior to obtain the forces and moments applied to the swash plate and to get the variable controlability on the variation of compressor speeds and swash plate chamber pressures. The results of simulation agree very well with the experimental data.

1. 서 론

기호설명

F : 작용력 [N]
M : 모멘트 [Nm]
P : 압력[kgf/cm²G]

그리스 문자

β : 사판의 경사각[deg]
 γ : 힌지 홀의 경사각
 μ : 마찰계수
 θ : 축의 회전각[deg]

차량용 에어컨 압축기는 에어컨 시스템을 구성하는 핵심 부품으로서 엔진으로부터 동력을 전달 받아 회전 하면서 증발기의 저온 저압 냉매를 고온 고압으로 압축하여 응축기로 보내는 역할을 수행한다. 이와 같은 차량용 압축기는 차량엔진의 회전수에 의해 운전 속도가 결정되며, 차량으로부터의 진동이 차체를 통하여 직접적으로 전달 받게 됨으로 높은 내구력과 신뢰성 및 에너지 절감을 위한 고효율이 요구 된다.

차량용 에어컨 시스템용으로 가장 널리 사용되고 있는 압축기는 사판식 압축기로, 클러치의 흡/탈착으로 냉방용량을 조절하는 고정 사판식 압축기와 피스톤이 연결된 사판의 경사각이 변화하여 냉방용량을 조절하는 가변용량형 사판식 압축기가 있다. Fig.1은 고정 사판식과 가변 용량 사판식 압축기의 단면을 보여 주고 있다.

[†] 두원공과대학 기술연구소
E-mail : leetjin76@empal.com

Tel : (031)670-7058 FAX : (031)670-7058

*두원공과대학 냉동공조과

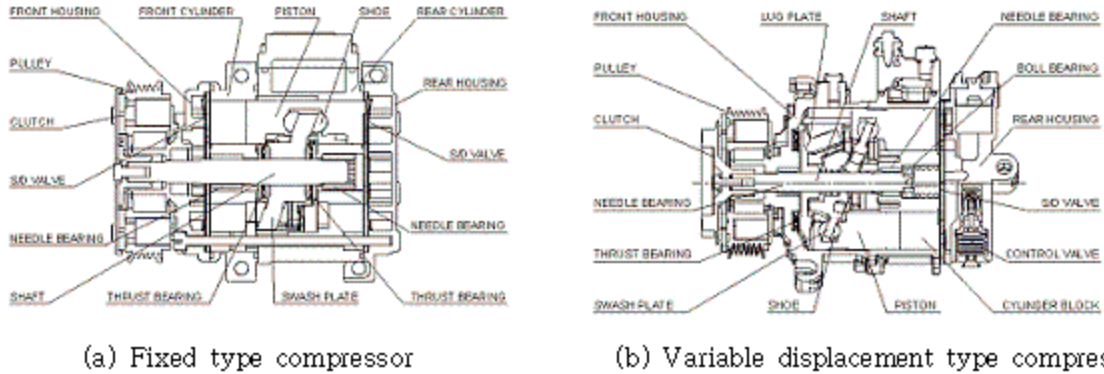


Fig. 1 Overall structure of swash plate type compressors

차량 실내의 냉방 부하에 비하여 차량엔진의 고속운전에 의해 과도한 냉방능력이 발생 할 경우 증발기에서의 온도와 압력이 낮아진다. 이때 고정식 압축기는 낮아진 온도를 감지하여 클러치를 탈착시킴으로 압축기의 구동을 정지 시키는 반면, 가변 용량 압축기는 증발기 또는 압축기 입구에서의 낮아진 압력에 의해 제어밸브가 사판실의 압력을 증가시킴으로 사판의 경사각을 작게 하여 냉매 순환 량을 감소시킨다.

고정식 압축기는 냉방부하를 맞추기 위하여 클러치가 계속적으로 흡/탈착됨으로, 이로 인한 압축기의 급격한 토크 변동은 차량엔진에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐만 아니라 차량의 승차감을 저하시키는 단점이 있다. 반면 가변용량 압축기는 사판의 경사각이 연속적으로 변화하기 때문에 압축기의 토크 변동이 적고, 차량 실내의 쾌적성을 향상 시킬 수 있는 장점이 있다.

2. 제어밸브

Fig.2는 가변사판식 압축기에 사용되어지고 있는 압력제어밸브의 단면도를 보여 주고 있다. 제어밸브의 흡입압 설정은 벨로우즈의 스프링 및 볼 지지 스프링에 의해 결정되며, 토출압의 영향을 받는다. 일반적으로 제어밸브의 설정 압력은 증발기에서의 서리 발생을 방지하기 위하여 $2 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ 이상으로 하는데, 차량엔진의 운전 속도 증가 또는 차량 실내의 냉방부하가 줄어들 경우는 압축기의 흡입압(P_s)은 설정 압보다 낮아지게

된다. 이와 같은 운전조건의 변화에 의해 압축기의 흡입압이 감소 할 경우에 있어 흡입실과 연통되어있는 벨로우즈는 팽창한다. 벨로우즈가 팽창함으로 벨로우즈와 연결된 로드 및 볼은 하단으로 이동되고, 볼에 의해 막혀있던 토출실과 사판실의 연결통로는 개도된다. 개도된 통로를 통하여 토출실의 고압가스(P_d)가 사판실로 유입되고, 사판실의 압력(P_a)을 증가시킨다. 사판실의 압력 증가는 사판의 경사각을 작게 하여 냉매 순환량을 감소시킨다. 따라서 에어컨 시스템의 냉매 순환량이 감소됨으로서 과도한 냉방 능력에 의한 흡입압의 저하 및 증발기에서의 서리 발생 현상을 방지 할 수 있다.

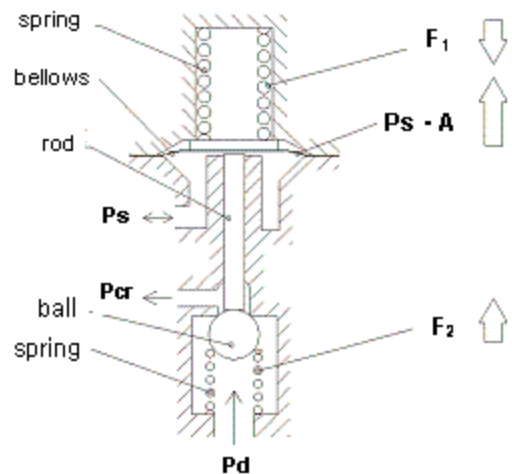


Fig. 2 Cross section view of Control valve

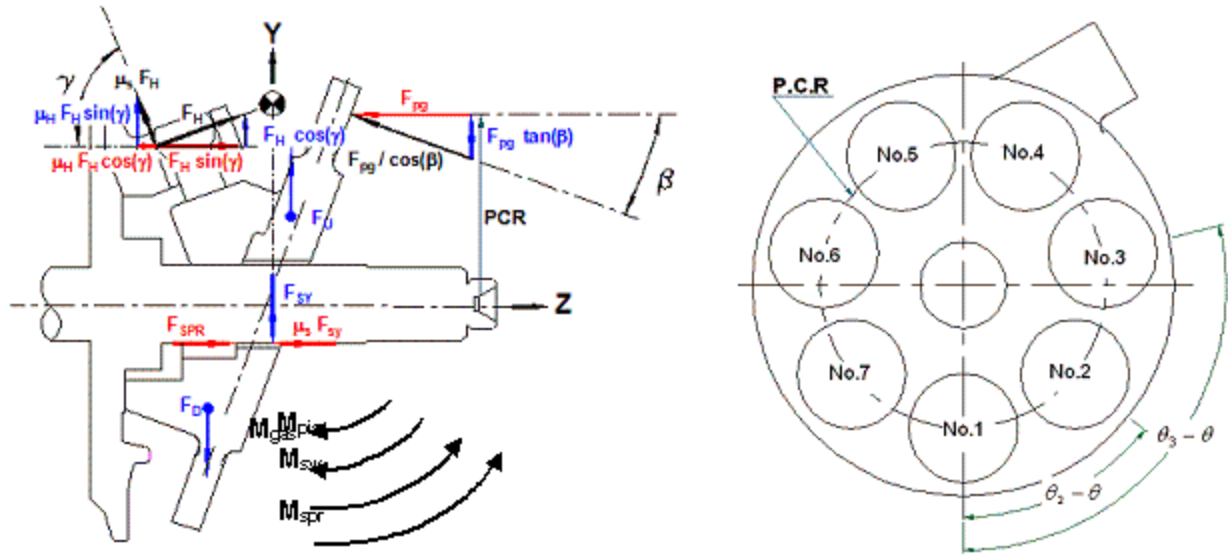


Fig. 3 Dynamics modeling of swash plate

3. 가변 사판의 동적 거동 해석

Fig.3은 가변 구조의 단면 및 각각의 위치에 작용하는 힘과 이들 힘에 의한 모멘트를 보여 주고 있다. 피스톤의 왕복운동에 의한 가스의 압축과정 시 피스톤으로부터 사판으로 전달되는 힘(F_{pg})은 실린더 내부와 사판실의 압력차에 의한 가스력(F_{gs})과 피스톤의 왕복운동에 의한 관성력($F_{inertia}$)의 합이고, 각각 식(1)과 식(2)와 같이 정의된다. 사판과 사판 균형추의 회전 운동에 의한 원심력(F_u , F_d)은 각각 식(3)과 식(4), 스프링이 사판을 지지하는 힘(F_{spr})은 식(5)와 같이 계산된다. 이와 같이 사판에 작용하는 반력은 각각 축에서의 반력(F_{sy})와 힌지에서의 반력(F_{sx})에 의해 구해진다.

$$F_{gs} = A_p \cdot (P_c(n) - P_c) \quad (1)$$

$$F_{inertia} = (m_p + 2m_s) \cdot \omega^2 \cdot P.C.R. \cdot \tan(\beta) \cdot \cos(\theta_n - \theta) \quad (2)$$

$$F_u = m_u \cdot y_u \cdot \omega^2 \quad (3)$$

$$F_d = m_d \cdot y_d \cdot \omega^2 \quad (4)$$

$$F_{spr} = k \cdot (L_{free} - L_{compression}) \quad (5)$$

그러므로 사판에 작용하는 힘의 평형 방정식은 식(6) 및 (7)과 같고, 평형 방정식으로부터 힌지 및 축에 작용하는 반력은 식(8),(9)와 같이 구할 수 있다. 식(10)은 사판의 경사각이 감소하기 위한 조건으로 마찰 계수의 방향은 양(+)의 값이 되고, 사판에 작용하는 모멘트의 합은 0보다 작을 경우 사판의 경사각은 감소하게 된다.

$$\sum F_y = \mu_H F_H \cdot \sin(\gamma) + F_H \cdot \cos(\gamma) + (F_u - F_d) - F_{sy} + F_{sx} \cdot \tan(\beta) = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_x = -\mu_H F_H \cdot \cos(\gamma) + F_H \cdot \sin(\gamma) + F_{spr} - \mu_s F_{sy} - F_{sx} = 0 \quad (7)$$

$$F_{sx} = \frac{F_{gs} - F_{spr} + \mu_s (F_u - F_d) + \mu_s F_{gs} \tan(\beta)}{\sin(\gamma) - (\mu_s + \mu_H) \cdot \cos(\gamma) - \mu_s \mu_H \cdot \sin(\gamma)} \quad (8)$$

$$F_{sy} = (\mu_H \sin(\gamma) + \cos(\gamma)) F_H + (F_u - F_d) + F_{sx} \cdot \tan(\beta) \quad (9)$$

$$\sum M = M_{gs} + M_{pb} - M_{su} - M_{sp} + (\mu_H \cdot F_H \cdot L_{ch} + \mu_s \cdot F_{sy} \cdot L_{\omega}) < 0 \quad (10)$$

$$\sum M = M_{gs} + M_{pb} - M_{su} - M_{sp} - (\mu_H \cdot F_H \cdot L_{ch} + \mu_s \cdot F_{sy} \cdot L_{\omega}) > 0 \quad (11)$$

반면, 사판의 경사각이 증가 할 경우는 식(11)과 같다. 사판의 운동 방향은 경사각이 감소할 경우와 반대 방향으로 작용함으로 마찰 계수의 방향은 음(-)의 값이 되고, 사판에 작용하는 모멘트의 합이 0보다 클 경우 사판의 경사각은 증가하게 된다.

사판에 작용하는 모멘트는 마찰계수가 양(+)인 경우 0보다 크고, 마찰 계수가 음(-)인 경우 0보다 작은 상황이 발생하는데, 이는 가스력, 피스톤 관성력, 사판의 원심력, 스프링력에 의한 모멘트를 힌지와 축에서의 반력에 의한 모멘트가 지지하고 있는 상황으로 사판의 경사각은 변화하지 않고 일정하게 유지 된다.

일단 사판 경사각이 변화하기 시작하면, 힌지와 축에서의 마찰계수는 정지 마찰 계수에서 동 마찰 계수로 현격히 줄어들게 된다. 그러므로 힌지와 축에서 작용하는 마찰 계수는 사판의 거동에 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 본 연구에서는 힌지와 축에 작용하는 정지 마찰 계수(μ_s)는 0.09, 동마찰 계수(μ_d)는 정지 마찰 계수의 1/2인 0.045를 사용하여, 실험의 결과와 비교 하였다.

4. 가변 사판의 동적 거동해석 결과

4.1 압축기 운전 속도에 따른 사판 거동

Table 1은 냉매 R134a를 사용하는 차량용 가변 압축기의 운전조건을 보여 주며, Table 2는 본 연구의 대상이 되는 압축기의 사양을 제시하였다.

Fig4는 압축기의 운전속도에 따른 사판에 작용하는 각각의 모멘트와 사판의 경사각을 보여 주고 있다. 계산은 사판의 경사각을 최대 경사각에서부터 사판에 작용하는 모멘트가 0보다 큰 경우 까지 사판의 경사각을 0.5간격으로 줄여갔다.

사판에 작용하는 모멘트의 합은 압축기의 운전 속도가 3500[rpm]까지는 0보다 크게 작용함으로 사판의 경사각은 최대 경사각을 유지하게 되고, 4000[rpm]에서는 작용하는 모멘트가 0보다 작음으로 사판의 경사각이 16.24도까지 줄고 사판에 작용하는 모멘트는 0이상이 됨으로 사판의 평형상태가 유지 된다.

압축기의 운전속도 3500[rpm]까지는 피스톤의 관성력과 사판의 원심력은 속도증가에 의해 연속

Table 1 Operating condition

Suction pressure	2.6 [kgf/cm ² G]
Discharge pressure	16 [kgf/cm ² G]
Suction temperature	15.8 [C]
Compressor speed	800~6000 [rpm]

Table 2 Compressor specifications

Cylinder number	7
Fitch circle diameter	81 [mm]
Piston diameter	32 [mm]
Stroke	28.27 [mm]
Suction volume	160 [cc]

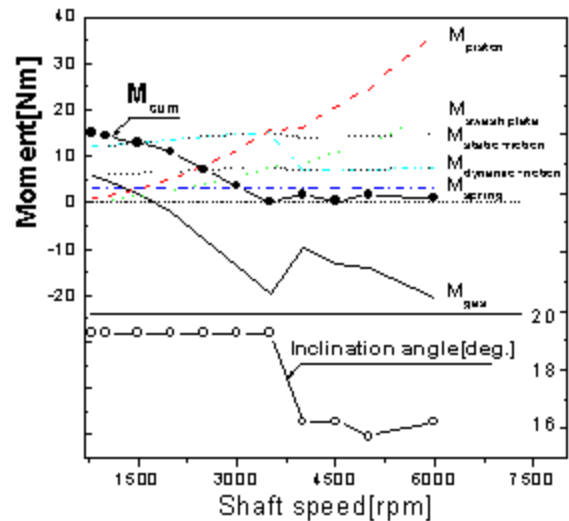


Fig. 4 Shaft speed vs. moment on swash plate

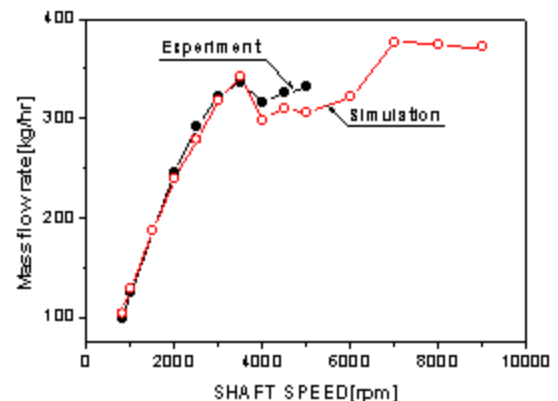


Fig. 5 Comparions of simulation results with experimental data

적으로 증가하고, 스프링력은 압축기의 운전 속도와 관계없이 경사각의 변화가 없으므로 동일하다. 반면, 가스력에 의한 모멘트의 크기는 점점 감소하는데, 이는 운전 속도가 증가함에 따라 실린더 내부로의 시간당 냉매 유입량이 증가함에 따라 흡입 밸브에서의 압력손실에 의해 실린더 내부압력이 낮아짐으로 실린더에서의 반력이 감소하기 때문이다. 힌지 및 축에서의 마찰에 의한 모멘트는 고속운전에 따른 반력상승에 의해 증가한다.

압축기의 운전 속도가 4000[rpm]인 경우 사판의 경사각이 19.24도에서 16.24도로 약 3도 가량 감소하게 된다. 사판의 경사각 감소에 의해 피스톤 관성력 및 사판의 원심력에 의한 모멘트의 증가량이 감소하고, 스프링력에 의한 모멘트는 스프링의 압축 길이가 짧아져 미소하게 감소하게 된다. 가스력에 의한 모멘트는 경사각이 감소하면서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 힌지와 축에서의 반력의 마찰력에 의한 모멘트는 급격히 감소하는데, 이는 사판의 경사각이 움직임으로 축과 힌지에서의 마찰 계수가 정지 마찰 계수에서 동 마찰 계수로 변화함으로 마찰력이 1/2수준으로 감소기 때문이다.

4000[rpm]이상의 고속 운전 중에는 5000[rpm]에서 사판이 경사각이 15.74도로 줄어 들고, 5500[rpm]에서 다시 경사각이 16.24도로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 4500에서 5000[rpm]으로 증가하면서, 실린더 내부의 압력저하 현상이 피스톤의 관성력과 사판의 원심력에 의한 모멘트의 차 보다 크게 작용함으로 사판의 경사각은 줄어들게 된다. 반면, 압축기의 운전 속도가 5500[rpm]에서는 피스톤의 관성력의 크기가 실린더 내부의 압력 저하 및 사판의 원심력에 의한 모멘트의 크기보다 크므로 사판의 경사각은 16.24도로 다시 증가하게 된다.

Fig.5는 압축기의 운전속도에 따른 냉매량 변화에 대한 실험값과 성능해석 결과를 비교하여 보여 주고 있다. 운전속도 4000[rpm]에서 냉매 순환량이 급격히 감소하는데, 성능해석 결과, 이는 사판의 경사각이 감소하면서 발생하는 현상임을 예측할 수 있다. 본 연구에서 가정한 힌지 및 축에서의 정지 마찰 계수 및 운동 마찰계수는 사판의 거동을 예측하는데, 적절한 값임을 실험을 통하여 알 수 있다.

4.2 사판실의 압력 변화에 따른 사판의 거동

가변 용량 압축기는 제어밸브의 개도량에 따라 고압의 토출 가스가 사판실로 유입됨으로 사판실의 압력이 변화한다. 제어 밸브의 개도량이 증가하여 사판실의 압력이 증가 할 경우, 사판실과 압축실의 압력차는 줄어들어 압력차에 의한 모멘트가 감소하고 사판의 경사각은 줄어들게 된다. 반면 제어 밸브의 개도량이 감소할 경우, 사판실 압력 저하에 의해 사판의 경사각은 줄어들게 된다. 이러한 제어 방식에서는 사판실의 압력 변화에 대한 사판의 경사각 변화가 연속적이며, 응답특성이 뛰어날 수록 좋다.

Fig.6은 압축기의 운전 속도가 2000[rpm]인 경우 사판실의 압력 변화에 따른 사판의 경사각을 보여 주고 있다. 사판의 경사각이 변화하기 위해서는 일정한 압력의 차가 요구되는데, 예를 들어 사판의 경사각이 감소하기 위한 사판실의 압력은 힌지와 축에서의 반력과 마찰 계수에 의한 모멘트보다 커야 한다. 이때 작용하는 모멘트는 정지 마찰 계수가 된다. 반면, 사판의 경사각이 감소하다 정지하는 순간의 마찰 계수는 정지마찰 계수의 1/2수준인 운동마찰 계수임으로 사판이 움직이는 순간과 정지하는 순간의 압력차(ΔP_1)는 운동 마찰 계수와 정지 마찰 계수의 차에 의해 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 사판의 경사각이 증가하는 과정과 사판의 경사각이 감소하는 과정에서의 압력차(ΔP_2)가 발생하는데, 이는 각각의 마찰 계수의 방향이 바뀜으로 인해 발생된다.

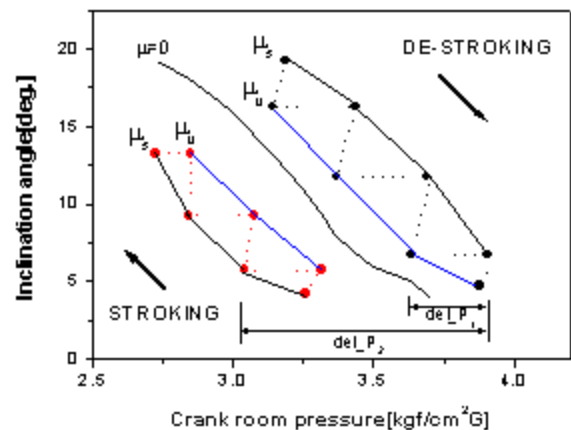


Fig. 6 Crank room pressure vs. inclination angle of swash plate

이와 같이 사판의 경사각을 변화시키기 위한 사판실의 압력차가 클 경우는 제어 밸브의 제어 성이 떨어짐과 동시에 사판의 급격한 경사각 변화를 야기 시킴으로서 가변 용량 압축기의 장점인 연속적인 용량제어가 불가능해진다. 힌지 및 축에 작용하는 마찰 계수가 정지 및 운동 마찰 계수가 모두 0일 경우는 사판실의 압력에 따라 사판의 경사각이 연속적으로 변화함으로 최적의 제어 특성을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 사판 및 힌지에서 마찰 계수는 가변의 특성을 결정하는 매우 중요한 인자가 된다.

Fig.7은 사판실의 압력에 따른 냉매순환량을 보여 주고 있다. 동일한 압력에도 경사각이 감소하는 과정과 증가하는 과정의 냉매순환량이 다른 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 경사각 증가시와 경사각 감소시의 사판실 압력에 따른 사판의 경사각이 다르게 형성되기 때문이다.

Fig.8은 사판의 경사각 변화에 따른 압축기의 체적 효율을 보여 주고 있다. 체적 효율은 사판의 경사각에 따른 이론적인 행정 체적과 냉매 토출량으로 부터 구해진다. 사판의 경사각이 감소하면서, 압축기의 체적 효율이 급격히 감소하는데, 이는 경사각이 줄어들면서, 압축기의 용량이 작아져 실린더와 피스톤 사이의 누설 량에 의한 체적 효율 현상이 뚜렷하게 발생하기 때문이다.

사판의 경사각이 동일한 경우에도 압축기 체적 효율은 경사각이 증가하는 과정이 약간 높게 나오고 있는데, 이는 경사각이 증가하는 경우의 사판실의 압력이 경사각이 감소하는 경우의 사판실의 압력에 비해 낮게 요구됨으로 토출 가스의 사판 실 유입이 작아져 바이패스(by-pass)에 의한 압축기의 체적 손실이 줄어들기 때문이다.

5. 결론

1. 가변 용량 사판식 압축기의 동적 거동 해석 결과와 실험의 결과를 비교하여 힌지와 축에서의 정지 마찰계수와 동마찰 계수는 각각 0.09와 0.045임을 알 수 있었다.
2. 운동마찰계수와 정지마찰계수의 차에 의해 발생하는 압력의 차압은 약 $0.25[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ 이다.
3. 사판의 경사각이 증가하다 감소 또는 감소하다 증가하기 위한 사판실의 압력차는 $0.8[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ 이다.

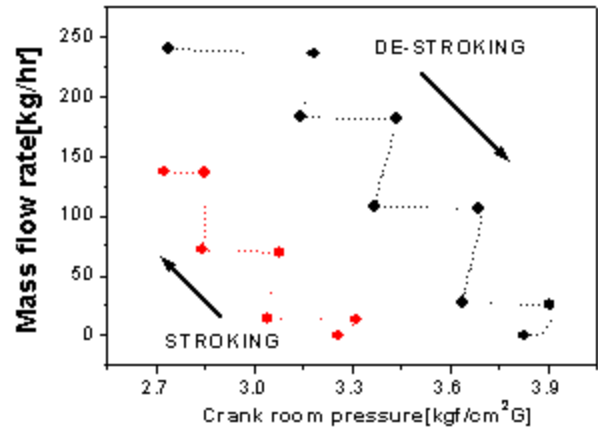


Fig. 7 Mass flow rate vs. crank room pressure

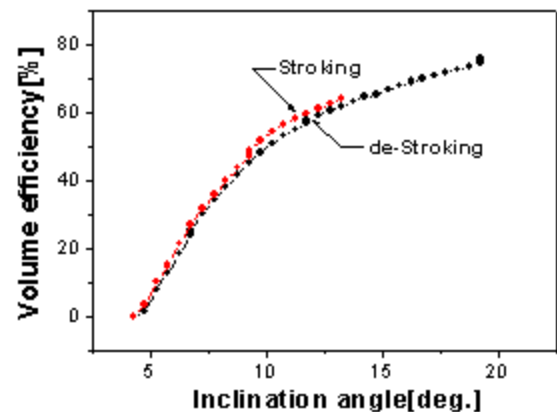


Fig. 8 Volume efficiency vs. Inclination angle of swash plate

참고문헌

- (1). Kazuhito, Miyagawa. and Hiroaki, Kayukawa. 1998, Development of the swash plate type continuously variable displacement compressor, Proceedings of the Society of Automotive Engineers, 980290
- (2). Geon ho Lee, Tae jin lee, 2004, A Study of variable displacement mechanism of swash plate type compressor for automotive air conditioning system, International compressor conference at Purdue, C079
- (3). 이태진, 이건호, 한영창. 2004, 차량용 가변용량 압축기의 동적 거동해석, 대한 설비공학회, PP771~776