

로타리 압축기의 베인,슬롯부 윤활해석

이상용 · 황선웅

LG 전자 리빙시스템연구소

Lubrication Analysis at the Vane & Slot Parts of Rotary Compressors

Sang-Yong Lee and Seon-Woong Hwang

Living System Research Laboratory, LG Electronics co.

Abstract - Rotary compressor is one of the most useful mechanism that is widely applied in refrigeration and air-conditioning systems. That is due to character of rotary compressor -compact, simple etc. While there is a lot of strong points, there is room for improvement because it is composed of many parts which have wear problem, friction losses and leakage.

In this paper, theoretical investigation about vane and slot parts at which we observe severe wear is carried out. Through the study of lubrication, the behavior of vane during one cycle can be predicted and the cause of wear at slot will be discovered. To solve the equations, fletcher-powell method is applied

The result of analysis show that vane bevell to the slot part with discharge port before rotation of shaft is 180 degree and bevell to the slot part with suction port after 180 degree. The motion of vane is divided 3 mode that depends on behavior of vane. This paper define the first mode when vane tilt to the compression chamber, the second mode when vane tilt to the suction chamber, and the third mode when vane move straightway.

Key words - vane, vane behavior mode, slot, lubrication, friction loss, wear, rotary compressor

1. 서론

로타리 압축기는 냉동,공조 시스템에서 냉매를 압축하여 한싸이클에서 냉매를 고온,고압의 상태로 변이 시켜 컨덴서에서 열을 방출하는데 용이하도록 하는 장치로써 그 구조가 간단해서 가정 및 산업체에서 널리 적용돼왔다. 로타리 압축기는 실린더 내부에 있는 베인과 축편심에 장착되어 있는 롤러가 흡입실과 압축실을 구분하며, 축이 회전함에 따라 롤러가 축에 편심을 가지고 운동하여 냉매를 압축하게 된다. 이때, 베인은 실린더 내 슬롯에서 직선 왕복운동하게 되는데, 베인의 후면에서 작용하는 배압과 스프링력, 관성력에 의해 롤러에 밀착되어 운동한다.

여러 논문에서 로타리 압축기의 동역학적 해석을 수행하였고, 압축부의 윤활상태 및 누설에 대해 연구를 하였다.[1-3] 그러나, 슬롯부의 윤활 분석 및 베인의 거동

에 대해서는 아직 보고된바 없다.

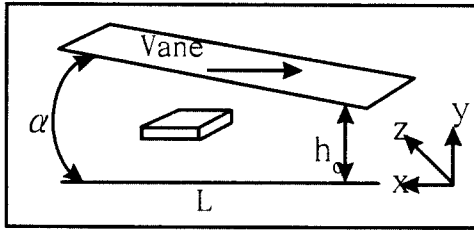
베인 운동에 있어 슬롯부 틈새에서의 유막형성과 운동 모드를 파악하게 되면, 압축과정중 베인과 슬롯부의 마찰과 마모등 현상에 대해 원인 규명이 가능하리라 생각한다.

그러므로, 본 논문에서는 베인과 슬롯부에서의 베인의 거동과 최소유막두께, 윤활 Mechanism에 대해 분석하고 마찰,마모 등의 관계를 살펴보고자 한다.

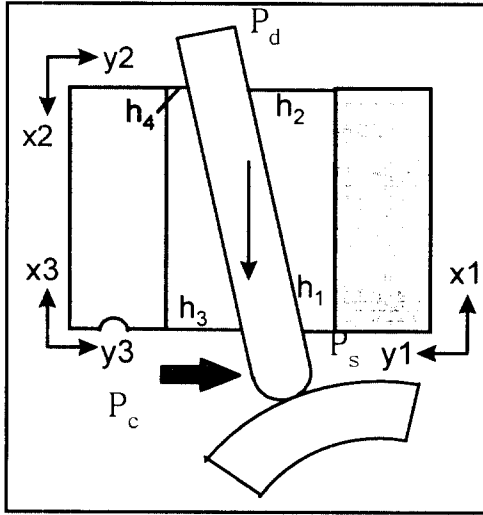
2. 해 석

2-1. 적용 모델

베인,슬롯부의 윤활 해석을 수행하기 위해 무한폭의 경사진 미끄럼 평면베어링 모델을 적용하였다. 베인,슬롯부에는 압축실부에 위치한 틈새와 흡입실부에 위치한 틈새로 2개가 있으므로, 이 틈새에서 미끄럼 베어링의 윤활 방정식을 각각 해석하고 전체 Governing Eqn.



[그림 1. 베인, 슬롯부 윤활해석모델]



[그림 2. 윤활 해석 개념도]

에서 이들 관계를 정의하였다. [그림 1]은 평행판 모델을 보여 주고 있으며, 베인, 슬롯부의 모델은 [그림 2]에 나타내었다.

2-2. 해석 이론

Reynolds Eqn을 경사진 미끄럼 평면베어링 모델에 적용하였다. 먼저 흡입실부의 틈새에 있어 Reynolds Eqn은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_1^3 \frac{\partial p_1}{\partial x} \right) = 6nU_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + \left(2n \frac{\partial p_1}{\partial t} \right) \quad \text{----(1)}$$

이때, 슬롯부 임의의 한점에서 유막두께는 최소유막 h_0 와 자세각 α 로 표현이 가능하다.

$$h = h_0 + \alpha x_1, \quad \frac{\partial h_1}{\partial x} = \alpha \quad \text{----(2)}$$

(1),(2)식을 x에 관하여 적분하고 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_1}{\partial x} &= \left(\frac{6nU_1}{h_1^2} \right) + \frac{T_1}{h_1^3} \\ p_1 &= \int \frac{6nU_1}{h_1^2} dx + \int \frac{T_1}{h_1^3} dx + T_2 \quad \text{----(3)} \\ p_1 &= f(h_{01}, \alpha_{01}) \end{aligned}$$

과 같다.

압축실부의 틈새에 있어 압력 및 관계식은 동등하지만 좌표계가 틀리므로 이를 하첨자 2로 나타내고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_2 &= \int \frac{6nU_2}{h_2^2} dx + \int \frac{Q_1}{h_2^3} dx + Q_2 \quad \text{----(4)} \\ p_2 &= f(h_{02}, \alpha_{02}) \end{aligned}$$

위의 식에서 적분상수값을 구하기 위해 Boundary Cond.을 적용하는데, 해석영역이 압축실부 또는 흡입실부에 위치하였는지에 따라 B.C는 바뀌며 다음과 같다.

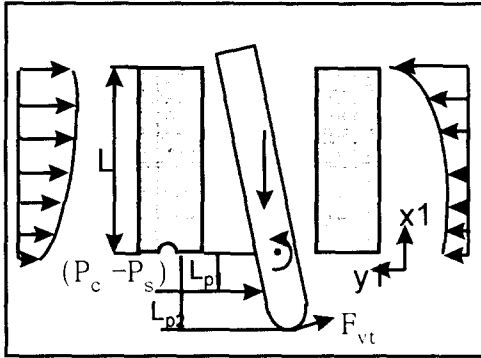
$$\begin{aligned} \text{흡입실)} \quad x_1 = 0, p = p_s \quad x_1 = L, p = p_d \\ \text{압축실)} \quad x = 0, p = p_d \quad x_2 = L, p = p_c \quad \text{----(5)} \end{aligned}$$

흡입실부와 압축실부의 해석 영역의 유막두께 h_{01}, h_{02} 와 자세각 α_1, α_2 는 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} h + (h + \alpha L) + (\cos(\alpha) - 1)t &= \text{틈새} \\ \alpha &= \alpha', (t \text{는 베인의 두께}) \quad \text{----(6)} \end{aligned}$$

위에서 구한 흡입실, 압축실에서의 유막압과 흡입실과 압축실의 차압에 의한 작용력 등에 있어서 $\sum F=0, \sum M=0$ 평형 조건을 만족하도록 식을 구성하였다. [그림 3. 참조]

$$\begin{aligned} \sum F = 0, \quad \sum M = 0 \\ L_c \int_0^L p_1 dx - L_c \int_0^L p_2 dx + L_c L p_1 (p_c - p_s) + F_{vt} = 0 \\ -L \int_0^L x p_1 dx + L \int_0^L x p_2 dx + L \frac{L_c^2}{2} (p_c - p_s) + L p_1 F_{vt} \\ = 10'' \quad \text{----(7)} \end{aligned}$$



[그림 3. 윤활 해석 모델]

2-3. 해석 Flow

베인의 거동 및 슬롯부의 유막형성에 의한 유막압이 베인/롤러등 압축부의 거동에 영향을 미치는데, 이를 분석하기 위해 일단계로 베인에 작용한 힘들을 힘, 모멘트 평형 조건으로 하여 베인, 슬롯부의 유막해석을 하고 윤활 관계식을 만족하도록 하였다. 다음 단계로 베인, 슬롯부의 유막압을 고려한 상태에서 동역학 분석을 수행하였다. (그림 4 참조)

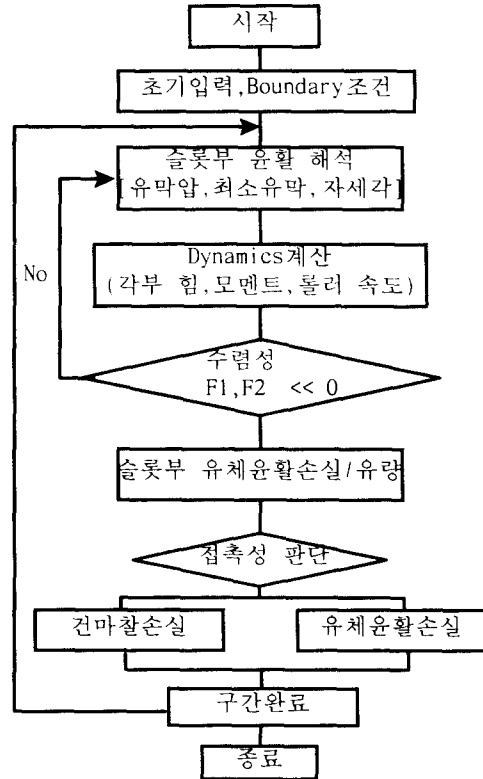
윤활 관계식에서 유막두께와 자세각을 미지수로 하고, 이를 수치해석을 이용하여 해를 구하였다. 보통 해를 구하기 위해서 적용하는 방법은 Newton-Rapson, Descent Method 등이 있으나, 본 연구에서는 Fletcher-Powell Method를 사용하였다.

또, 구해진 최소 유막 두께로부터 베인과 슬롯이 접촉(Contact)할 것인지 여부를 조도와 형상계수를 통하여 결정하고, 접촉 발생시 건마찰로 분석하였으며, 그 외에는 유체 윤활로 가정하였다.

3. 해석 결과

3-1. 베인, 슬롯부의 유막두께

전체 Dynamics로 부터 축회전각 10 마다 실린더내 압력과 베인의 이동속도등을 계산하고, 이를 조건으로 하는 베인, 슬롯부에서의 윤활 방정식이 힘, 모멘트 평형조건을 만족하도록 하면, 각회전각에서의 유막두께를 구해낼수 있다. 여기서, 각부분의 유막두께는 윤활방정식에서 구한 h_0, α 값으로부터 계산된다. 실린더의 흡입실부 하단의 유막을 h_1 이라하고, 흡입실부 상단을 h_2 , 압축실부 하단 h_3 , 압축실부 상단 h_4 (그림 2 참조)라 표기하고, 유막 두께



[그림 4. 해석 Flow Chart]

를 나타내면 [그림 5~6]과 같다

흡입실하단의 유막(h_1)

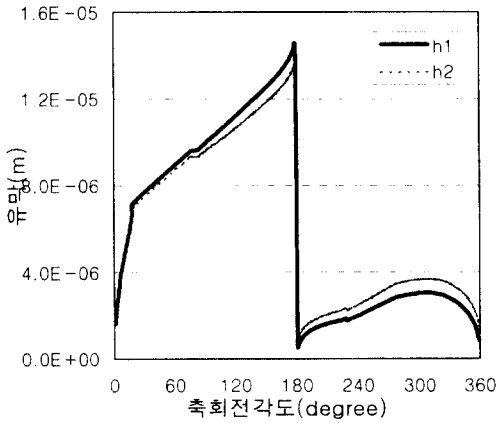
상사점에서 h_1 의 유막은 $1\sim 2\mu\text{m}$ 이하로 작으며 베인의 속도가 증가함에 따라 유막은 급격히 증가한다. 180° 이전까지 유막은 계속 증가하며, 180° 에서 베인의 속도가 0이 되어 유막은 순간적으로 파괴되고, 이 각도를 중심으로 베인의 운동모드가 완전히 변하게 된다. 여기서 발생하는 불연속점은 유막의 Squeeze 효과를 무시로 함으로부터 기인하지만, 실제 유막두께에 있어서도 급격한 감소가 예상된다. 180° 이후로는 유막이 $3\sim 4\mu\text{m}$ 이하로 형성되어 이 회전각에서는 슬롯부의 조도보다 작게되므로 Metal Contact가 발생하게된다.

흡입실상단의 유막(h_2)

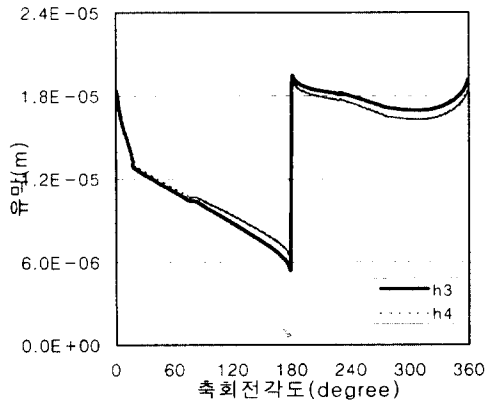
흡입실하단의 유막(h_1)과 거의 비슷한 경향을 가지며, 180° 이전에서는 h_1 보다 작은 유막을, 그이후각도에서는 h_1 보다 큰 유막을 갖게 된다.

압축실하단의 유막(h_3)

상사점에서 베인이 내려올때 유막두께는 상당



[그림 5. 압축실부 상하단에 있어서 슬롯부의 유막두께 (h1,h2)]



[그림 6. 흡입실부 상하단에 있어서 슬롯부의 유막두께 (h3,h4)]

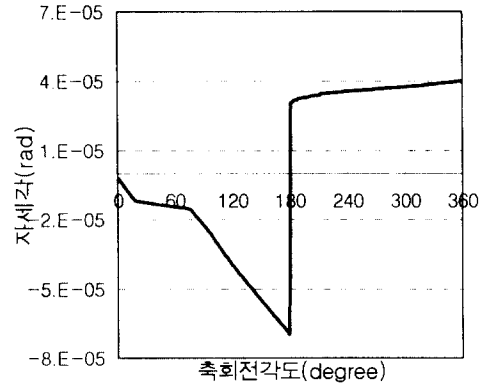
히 빠르게 작아지게 되며, 180°에서 역시 유막의 급격한 변화가 있게 된다. 전체 싸이클 동안 유막은 조도에 비해 크게 형성된다.

압축실상단의 유막(h4)

압축실하단의 유막의 변화와 유사하다.

3-2. 베인의 운동 (자세각 α)

0~360° 회전 구간동안 2번 운동자체가 변화하게 되는데, 이러한 모드의 변화는 베인이 상·하사점에 왔을 때 일어나게 된다. 베인이 하강하는 동안에 압축실에서 발생한 압과 베인 선단의 마찰력 등의 힘, 모멘트를 보상하기 위해서, 흡입실측 베인, 슬롯부 틈새에서는 압축실측보다 높은 압력구배가 필요하게 된다.



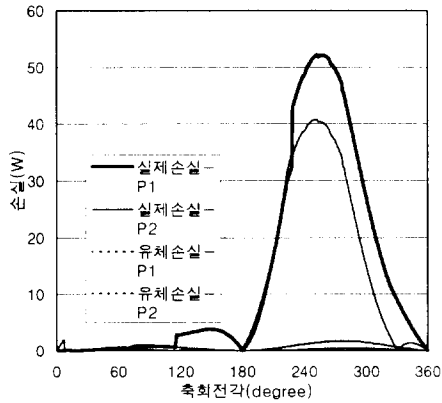
[그림 7. 베인의 자세각 (α)]

이렇게 필요한 흡입실측의 높은 압력구배는 미끄럼 평면 베어링의 원리에 의해서 베인이 하강하는 동안에 압축실측으로 기울어지는 모드를 나타나게 한다. 이와는 반대로 하사점에서 베인이 상사점으로 이동하게 될 때는 역시 압축실측의 압력, 베인 선단력 등의 힘 및 압축실측의 틈새에서 발생하는 압력에 의한 힘, 모멘트와 평형을 이루기 위해 압축실측 압력구배보다 높은 압력구배가 필요하고 이에 따라 베인은 흡입실측 하단에서 압축실측 상단으로 기울어지는 모드를 나타낸다. 베인이 하사점으로 내려가는 동안은 베인의 자세각이 크게 형성되고, 베인이 상사점으로 운동하는 동안에는 비교적 베인의 기울어짐이 적게 나타나는 특성치로 결과는 보여주고 있다.

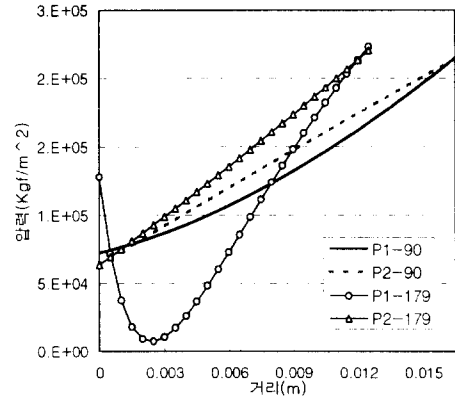
3-3. 슬롯부 마찰손실

본해석에서는 마찰손실을 분석할 때, 크게 두 가지 방법을 이용하였는데, 이는 각부의 유막 두께와 관련되며 다음과 같다.

축회전각 따라 유막두께를 해석하고 유막이 조도보다 크게 형성되었을 때는 유체유향에 의한 손실이 발생하는 것으로 보았고, 유막이 조도보다 작게 되었을 때는 금속간의 접촉이 발생하는 것으로 분석하였다. 또, 유막이 조도보다 작게 형성되면, 실제적으로 유막에 의한 평형은 더 이상 성립하지 않는 것으로 평가하여 슬롯부의 반력에 의한 손실량을 계산하여 마찰손실로 취하였다. 이와같은 결과는 [그림 8]에 나타내었으며, 슬롯부의 건마찰계수는 0.15로 취하였다. 또, 슬롯부의 마찰손실을 보면, 건마찰에 의한 손실이 마찰손실의 대부분을 차지하였으며, 총 22.67W로 평가되었다.



[그림 8. 슬롯부의 마찰손실]



[그림 9. 90°, 179°에서의 압력구배]

3-4. 슬롯부 틸새에서의 압력구배

편의상 압축실측 유막에서의 압력을 P1, 흡입실측 유막에서의 압력을 P2 라고 하고, 각각의 축회전각을 표시하였다.

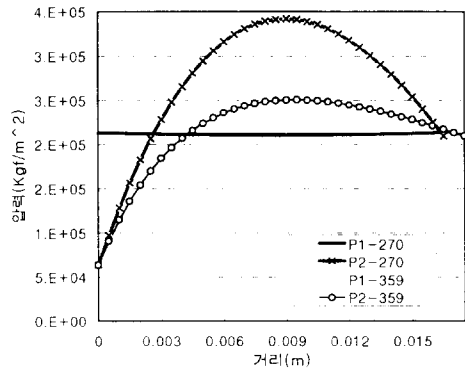
[그림 9]에는 90°, 179°에서의, [그림 10]에서는 270°, 359°에서의 압력 Profile 을 나타내었다.

베인이 하사점에 내려오는 동안 흡입실측의 압력구배는 베인의 운동으로 인한 오일압력의 영향이 나타나지 않고 흡입압과 토출압의 조건에 의해서만 선형적으로 나타나는데, 이는 점도가 실기 운전조건하에서는 상당히 작으며 (3cP), 또 흡입실측에서 유막이 충분히 크게 형성되기 때문인 것으로 보인다. 또, 압축실측의 압력구배는 베인이 하강운동하는 동안에 아래로 오목한 형태의 압력구배를 갖게 되며, 이는 베인의 운동과 더불어 오일이 좁은 틸새에서 큰 틸새로 유동하는 현상에 의해 발생한다.

한편, 베인이 상사점으로 운동하는 동안 압축실측에서는 유막이 충분히 크게 형성이 되기 때문에 오일압에 의한 영향은 나타나지 않고, 흡입실측의 유막에서만 볼록한 압력구배를 나타나게 되는데, 이러한 볼록한 압력구배는 오일의 유동이 큰 틸새에서 작은 틸새로 일어날때 발생한다.

4. 결론

본 연구에서는 로타리 압축기에 있어서 베인, 슬롯부의 윤활 Mechanism 과 베인의 운동모드, 마찰등을 분석하기 위하여 압축기의 동역학해



[그림 10. 270°, 359°에서의 압력구배]

석을 기초로 하여 슬롯부의 윤활관계식을 해석하고 전체 평형방정식을 만족하도록 함으로써, 슬롯부 틸새에서의 유막두께와 자세각, 압력구배등을 구하고 이를 통하여 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

- (1) 베인은 한싸이클동안 3 가지 모드로 운동하게 되는데, 0~180° 구간에는 베인이 압축실 쪽으로 기울어지며, 181~360° 구간에는 흡입실 쪽으로 기울어져 있고, 0°, 180°에서는 2 가지 모드가 급격히 변화하게 된다.
- (2) 흡입실측부 슬롯에서 유막의 두께는 슬롯의 조도보다 작게 되어 금속 접촉이 발생하게 되고, 이와같은 접촉이 발생된 경우는 마찰은 접촉에 의한 마찰로 평가되며, 마모가 발생이 예상된다.
- (3) 유막이 깨어져 접촉이 발생했을때 마찰손실은 건마찰에 의한 손실로 분석되며 이때는 슬롯에 의한 반발력에 의한 평형식을 이용하여 계산하게 되는데 20W 정도의 손실이 계산

되었다.

(4) 배인이 운동하는 동안의 슬롯부에서의 압력은 유막의 두께와 자세각에 의해 결정되는데, 배인이 하사점으로 운동하는 동안은 압축실측에 오목한 형태의 압력구배가 형성되고, 흡입실측에서는 선형구배가 나타난다. 상사점으로 운동하는 경우에 있어서는 압축실측의 압력구배가 선형으로 나타나고, 흡입실측에서 볼록한 형태의 압력구배가 나타난다