

스크롤 압축기에서 축방향 순응하는 고정부재의 안정성

Stability of the axially compliant fixed scroll in scroll compressors

김 현 진*, 이 원 학**
H. J. Kim, W. H. Lee

Key words : scroll compressor(스크롤 압축기), fixed scroll(고정부재), orbiting scroll(선회부재), scroll wrap(스크롤랩) axial compliance mechanism(축방향 순응기구), overturning moment(전복모멘트), overturning angle(전복각)

Abstract

This study presents a way of improving the stability of fixed scroll in scroll compressors. For the scroll compressor whose fixed scroll is designed to move in the axial direction for the axial compliance, the fixed scroll is under the influence of the overturning moment produced by internal gas forces. Unless the overturning moment is properly compensated by the moments of reaction forces at the suspension of the fixed scroll to the compressor frame, the fixed scroll would exhibit wobbling motion, increasing gas leakage through the gap induced by the wobbling of the fixed scroll between the two scroll members. The conditions on which the wobbling motion can be suppressed have been found analytically; The axial position of the fixed scroll suspension should be made within a certain range. The upper limit of this range is the axial location for the o-rings which are inserted between the fixed scroll and the back pressure chamber to promote sealing for the gas in the back pressure chamber. And the lower limit is mainly determined by the magnitude of the axial sealing force. As long as the axial sealing force is not negative over all crank angles, the lower limit is not above the mid-height of the scroll wrap. Larger axial sealing force lower the lower limit.

기호설명

A	: 면적	F_m	: 운전조건 #6에서 압축기 한 회전당
c_i	: 상수	F_{seal}	: 축방향 밀봉력
$F_{ax}F_{tg}F_{ig}$: 축방향, 반경방향, 접선방향 가스력	$F_{spr}, F_{spr}, F_{spr}$: 스프링 반력의 x, y, z 방향성분
		f_s	: 반경방향 밀봉력
		h	: 랩 높이
		k	: 스프링 상수
		l	: 길이

* 정회원, 인천대학교 기계공학과

** LG전자 리빙시스템 연구소

M_m	: 압축기 한 회전당 전복모멘트 평균값	tip : 랩 선단
n	: 고정부재 체결점 수 (즉 리프 스프링 수)	v : 체적
M_i, M_θ	: 전복모멘트의 반경방향 및 접선방향 성분	x : x방향
M_i	: 전복모멘트	y : y방향
O_1, O_2	: 고정부재 및 선회부재 중심	z : z방향
P	: 압력, 스프링 체결지점	
Q	: 고정부재와 선회부재의 접촉점	
r_a	: 선회반경	
$R_{cnx}, R_{env}, R_{cnz}$: Q점에서의 반력의 x, y, z 성분	
V	: 압축실 체적	

그리스 문자

α	: 전복각
β	: 전복모멘트 작용 방향각
δ	: 리프스프링 초기변위
η	: 효율
θ	: 크랭크각, 접선방향(하첨자인 경우)
θ_i	: 스프링 체결점 방위각
μ	: 마찰계수

하 첨 자

a	: 축방향
ad	: 단열압축
b	: 배압실
c	: 압축실
CB	: 체결점
cn	: 접촉점
d	: 토출
e	: 고정부재 토출구
f	: 고정부재
i	: i 번째
LS	: 리프스프링
or	: 오링(o-ring)
r	: 반경방향
s	: 흡입, 선회부재
t	: 전체

1. 서 론

일반적으로 냉매압축기의 체적효율에 영향을 끼치는 요인으로는 흡입가스의 가열, 간극체적손실, 밸브 통과손실, 내부누설 등이 있다. 냉매압축기가 그 사용 범위가 점차 확대되고 있는 스크롤 압축기가 종래의 왕복동식 압축기에 비해 지니는 여리가지 장점중의 하나로서 높은 체적효율을 들 수 있다. 스크롤 압축기가 종래의 왕복동식에 비해 체적효율이 우수한 이유는 무엇보다도 스크롤식에는 간극체적손실이 존재하지 않으며 또한 흡·토출 밸브통과 손실이 없다는데 있다.

한편 흡입가스의 가열 현상은 저압식(low side pressure) 압축기라면 왕복동식이나 스크롤식을 막론하고 체적효율을 낮추는 공통요인이 된다. 밀폐형의 경우 모터에서 방출되는 열이 흡입가스를 가열하게 되는데, 통상 냉동능력이 3톤인 에어콘에 사용되는 압축기의 경우 모터에서 발생하는 열로 흡입가스의 온도가 약 10°C 정도 높여지며 이 정도의 흡입 가스 가열은 약 3~4% 정도의 냉동능력 손실을 가져오게 된다. 고압식(high side pressure)에서는 이러한 흡입가스의 가열을 최소화 해주기 위해 흡입가스를 압축기 셀 내부의 흡입실로 직접 유입되도록 하는 흡입유도관을 사용한다.

반면 스크롤식에서의 문제점으로 압축실 내부 누설을 들 수 있다. 왕복동식에서는 실린더와 피스톤 사이의 간극을 최소 적정치로 해주기 쉬운 반면, 스크롤 압축기에서는 복잡한 스크롤랩(wrap) 형상으로 인해 누설 간극을 최소화 하는 것이 그리 간단하지는 않다. 스크롤 압축기에서 냉매의 누설은 선회부재와 고정부재 사이의 틈새를 통해 이루어 지는데, 이러한 틈새는 냉매가스의 누설경로에 따라 축방향 틈새와 반경방향 틈새로 나눌 수 있다. 반경방향틈새는 선회부재와 고정부재의 랩·축

면 사이의 틈새를 일컬으며 축방향 틈새는 한쪽 부재의 스크롤 랩 선단과 다른쪽 부재의 기판(baseplate) 사이의 틈새를 가리킨다. 이러한 틈새 조절을 다만 가공과 조립의 정밀도에만 의존하는 것은 비생산적 일 뿐만 아니라 좋은 결과를 기대하기도 어렵다.

스크롤 압축기에서는 이러한 누설이 일어나는 틈새를 최소화하고 또한 압축기실내로 액냉매가 주입될 때 가스압이 급상승하는 등의 사태에 대응할 수 있도록 다양한 순응기구(compliance mechanism)들이 사용되고 있다. 세계 각국에서 생산되는 스크롤 압축기에 현재 적용되고 있는 순응기구들로서 반경방향 순응기구로는 편심부시(eccentric bush)나 슬라이더 블럭(slider block) 등이 있고, 축방향 순응기구로는 배압실(back pressure chamber) 방식 등이 있다. 배압실은 고정부재나 또는 선회부재의 배면에 설치되는데, 선회부재측에 설치한 예로는 일본의 히다치(日立)의 스크롤을, 고정부재측에 설치한 예로는 미국 코플랜드(Copeland)의 스크롤을 들 수 있다. 배압실의 역할은 배압력을 발생시켜 선회부재와 고정부재가 서로 밀착되도록 축방향력을 제공하는 것이다. 선회 및 고정부재의 조합으로 이루어지는 압축실 내부에서는 이 두 부재를 서로 떨어지도록 밀어내려는 축방향 가스력을 발생시키므로 배압력을 통해 이 축방향 가스력을 상쇄하여 적절한 밀봉을 유지하고자 하는 것이다.

본 연구에서는 배압실이 고정부재의 배면에 설치되었을 때, 고정부재의 동적 안정성을 제공해 주는 고정부재의 체결위치와 고정부재 운동의 불안정성이 발생시킬 수 있는 누설로 인한 체적효율의 감소 등의 압축기 성능에 끼치는 영향에 대해 살펴 보고자 한다.

2. 고정부재의 안정성 해석

2.1 축방향 밀봉력(Axial sealing force)

압축실 내부에서 발생하는 축방향 가스력을 상쇄시켜 줄 수 있는 힘을 고정부재의 배면에 발생시킴에 있어서, 그 힘의 균원을 토출압, 토출압과 중간압의 조합, 또는 중간압 등에서 얻을 수 있다. 여기서는 토출압과 중간압의 조합을 이용한 배압방식

에 대해 고려해 보고자 한다.

Fig.1은 고정부재의 배면에 배압실이 설치되어 있는 구조의 스크롤 압축기 단면도를 보여준다. 크랭크축이 회전하면 편심된 크랭크 핀에 연결된 선회부재는 자전방지 기구의 도움으로 고정부재의 중심을 선회한다.

선회부재는 그 후면에서 스러스트 베아링으로 지지되고 있어 축방향으로의 운동이 무시될 수 있는 반면, 고정부재는 축방향으로 미세한 이동이 가능하도록 리프 스프링(leaf spring)으로 연결되어 있다. 이러한 체결은 고정부재와 선회부재와의 엄격한 축방향 간격에 대한 요구를 상당히 완화시키 준다. 즉 조립시 선회부재와 고정부재와의 축방향 간격을 어느 범위내에 있도록 해주기만 하면 운전시 고정부재의 상하에 작용하는 힘의 차이인 축방향 밀봉력에 의해 고정부재가 선회부재쪽으로 밀려 밀착되게 된다.

이렇게 밀착된 고정부재와 선회부재는 서로 맞물려서 Fig.2 (b)에서와 같은 초생달 모양의 압축실들을 형성하고(빗금쳐진 부재가 고정부재), 이 압축실들은 선회부재가 선회함에 따라 중앙부로 이동함과 동시에 점차 그 체적이 감소하게 되므로 압축실내의 냉매 가스는 점점 압축되게 된다. 이렇게 압축된 가스는 최종적으로 중앙의 토출구를 통해 토출실로 나가게 된다.

Fig.2 (a) (b)는 고정부재와 선회부재가 형성하는 압축실내에서 발생하는 각 방향으로의 가스력을

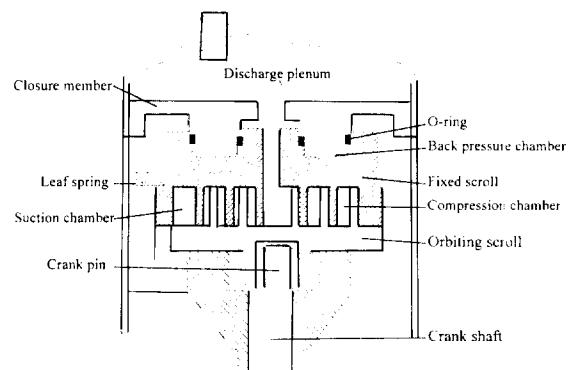


Fig.1 Schematic diagram of scroll compressor

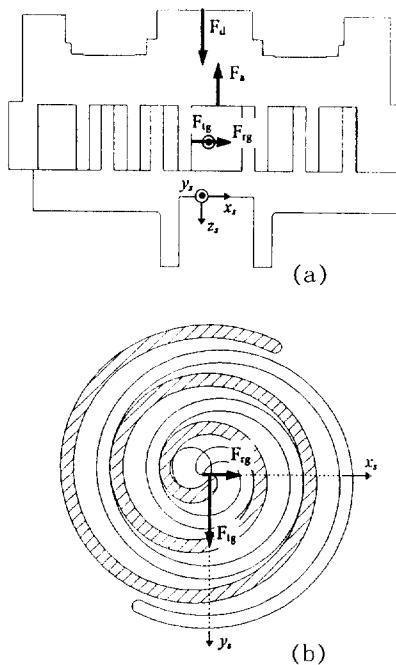


Fig.2 Gas forces acting on fixed scroll member;(a) vertical view (b) horizontal view

보여준다. 여기서 Fig.2 (a) (b)와 Fig.4를 참조하여 각 방향을 다음과 같이 정의 한다. 축방향은 압축기의 크랭크축 방향으로서 z_s 로, 반경방향은 고정부재의 중심과 선회부재의 중심을 잇는 방향으로서 x_s 로, 접선방향은 선회부재의 선회방향으로서 y_s 로 표기한다. 이럴때 F_d 는 고정부재와 선회부재를 서로 밀어내려고 하는 축방향 가스력으로, F_{cg} 는 양 부재를 서로 가까워지도록 밀어주는 반경방향 가스력으로 불리우며, F_{rg} 는 접선방향 가스력으로서 선회부재에는 선회방향과는 반대방향으로, 고정부재에는 선회방향과 일치하는 방향으로 작용한다.

고정부재에 작용하는 축방향 힘들로는 Fig.2(a)의 축방향 가스력 F_d 와 고정부재를 아래의 선회부재쪽으로 밀어주는 배압력 F_d , 그리고 Fig.1에서의 리프 스프링에 기인한 스프링력 $\sum F_{spc,i}$ 있으며, 이러한 축방향 힘들의 차이가 축방향 밀봉력 F_{seal} 이 된다. 즉 F_{seal} 은 식(1)과 같다.

$$F_{seal} = F_d - F_a - \sum F_{spc,i} \quad (1)$$

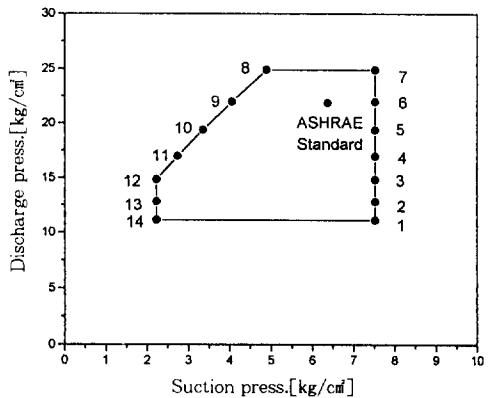


Fig.3 Operating envelope for air conditioning compressor

여기서 배압력 F_d 는 배압실 면적을 A_d , 고정부재가 노출된 면적을 A_a 라고하면 $F_d = (p_d - p_s) \cdot A_d + (p_s - p_i) \cdot A_a$ 이 되며, 스프링 반력 $\sum F_{spc,i}$ 는 고정부재가 단순히 축방향 변위만 δ 만큼 일으킨다면 $\sum F_{spc,i} = k_n \delta$ 이 된다. 스프링력은 항상 상향력이 되는데 이는 고정부재가 하향 배압력에 의해 원래의 위치로부터 이미 아래로 밀려 내려졌기 때문이다.

축방향 밀봉력을 크게 해 줄수록 확실한 밀봉을 얻을 수 있다는 면에 있어서는 좋으나, 양부재 사이의 마찰력을 이 축방향 밀봉력에 비례하여 증가하게 되므로 압축기 전반적인 성능의 관점에서는 적정 수준의 축방향 밀봉력이 요구된다. 하지만 Fig.3에서 보여지는대로 공조용 냉매 압축기의 운전범위는 상당히 넓기 때문에 이러한 축방향 밀봉력이 항상 적정치를 지닐 수 있도록 배압력을 조절하는 것은 간단하지 않다. 토출압이 높은 경우에는 배압력이 증가하여 과다한 마찰손실을 유발할 수 있으며, 토출압이 낮을 경우에는 축방향 밀봉력이 음(−)으로 되어 고정부재가 선회부재에 밀착되지 못하게 되는 수도 있다.

2.2 전복 모멘트(overturning moment)

식(1)의 축방향 밀봉력이 비록 양(+)의 값을 갖고 있다 할지라도 여전히 양 부재 사이에 축방향으로의 틈새가 생겨 누설이 발생할 수 있는데, 이러한 가능성은 압축실내의 가스력에 의한 모멘트 발생에 기인한다. 이러한 가스력에 의한 모멘트는

전복모멘트라 불리우며 전복모멘트는 고정스크롤을 전복시키려는 작용을 한다.

전복모멘트는 원칙적으로 고정부재 및 선회부재 양쪽에 모두 작용한다. 배압실이 선회부재의 배면에 설치되어 있고 고정부재는 어느 방향으로든 전혀 움직일 수도 없도록 완전 고정된 경우에는 선회부재에 작용하는 전복모멘트를 고려해 주면 된다.⁽¹⁾ 하지만 고정부재가 축방향 순응을 하는 스크롤 압축기의 경우에는 전복모멘트의 주된 영향은 고정부재 쪽에 있다. 이 경우 선회부재의 축방향으로의 운동은 선회부재의 기판 후면에서 선회부재를 지지해 주는 스러스트 베아링면과 선회부재 기판 후면과의 사이를 채우고 있는 오일막(oil film)내에서 일어날 수 있으나 여기서는 선회부재가 축방향으로 이동하거나 또는 기울게 되는 등의 거동은 각다고 여겨 무시하기로 한다.

Fig.4는 고정부재에 작용하는 힘과 모멘트의 작용도이다. O_1 은 고정부재의 기초원 중심을, O_2 는 선회부재의 중심을 나타내며 좌표(x_s, y_s)는 선회부

재의 선회에 따라 O_1 을 중심으로 자전하여 축 x_s 가 항상 선회부재의 중심 O_2 를 통과한다. 축방향 가스력 F_a 와 접선방향의 가스력 F_{as} 는 $\overline{O_1 O_2}$ 의 중앙점 즉 선회반경의 중심점에 작용하되 축방향으로는 F_a 는 고정부재의 기판에 그리고 F_{as} 는 스크롤랩 높이 중심에 작용한다. 반경방향 가스력 F_{ar} 와 반경방향의 밀봉력 f_r 는 고정부재의 중심 O_1 에서 각각 스크롤랩 높이의 중심에 가해진다.

선회반경을 r_s , 랩의 높이를 h 라 할 때, 이러한 힘들이 발생시키는 x_s 축 방향으로의 전복모멘트 M_x , y_s 축 방향으로의 전복모멘트 M_y 는 각각 다음의 식들로 표현된다. 모멘트의 z_s 축 방향 중심은 선회부재의 기판 상면에 둔다.

$$M_x = F_{ar} \frac{h}{2} \quad (2)$$

$$M_y = F_a \frac{r_s}{2} - (f_r + F_{ar}) \frac{h}{2} \quad (3)$$

또한 고정부재에 작용하는 총 전복 모멘트의 크기 M_θ 와, M_θ 가 x_s 축과 이루는 각으로 정의되는 전복모멘트 방향각 β 는 각각 다음과 같이 된다.

$$M_\theta = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}, \quad M_\theta = M_x \sqrt{1 + (M_y/M_x)^2} = M_x / \cos \beta \quad (4)$$

$$\beta = \tan^{-1}(M_y/M_x) \quad (5)$$

여기서 총 전복모멘트의 방향을 x 로 하고, O_1 을 중심으로하는 직교좌표계(x, y, z)를 정의한다.

2.3 고정부재 체결위치

고정부재가 전복모멘트의 영향으로부터 자유로운 조건을 찾기 위해 앞서, 먼저 고정부재가 전복모멘트에 의해 전복되는 조건을 다음과 같이 구한다. 고정부재가 Fig.4와 같이 전복모멘트에 의해 반드시 방향으로 α 만큼 기울었다고 가정해 보자. 그러면 이러한 전복에 의해 앞에서 고려한 힘들외에도 추가적인 힘들이 발생하게 된다.

먼저 고정부재와 선회부재는 점접촉을 하게 되는데 이 접촉점을 Q 라고 하면, Q 는 y 축상에 놓이게 되며 이 접촉점에서의 각 방향별로 R_{cnx} , R_{cny} , R_{cnz}

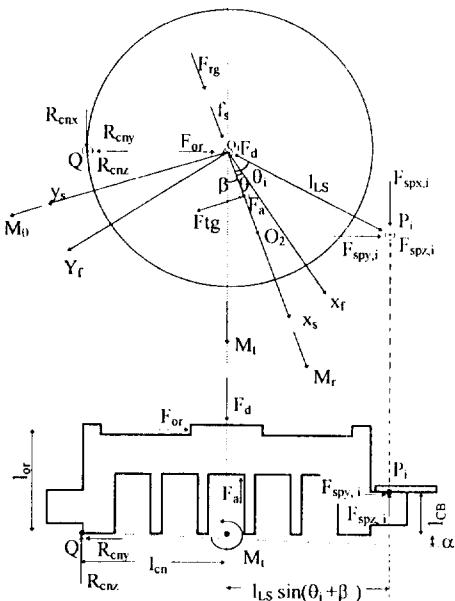


Fig.4 Diagram of forces and moments acting on fixed scroll

의 반력들이 발생한다. 또한 매암실의 누설방지를 위해서 설치한 오링에서도(Fig.1 참조) 고정부재의 기울음에 의해 반력이 발생하는데, 이 반력 F_{α} 은 $-y$ 축 방향이 된다. 점 P_i 는 리프스프링의 i 번째 체결위치를 나타내며, θ_i 는 x 축에서부터 i 번째 체결점까지의 사이각이다. 이럴때 고정부재에 작용하는 힘과 모멘트 평형은 다음과 같다.

$$R_{\alpha} + F_d + F_a + \sum_i F_{sp,i} = 0 \quad (6)$$

$$F_{\alpha} + \sum_i F_{sp,i} - R_{\alpha} + (f_s + F_{r,k})\sin\beta - F_{t,k}\cos\beta = 0 \quad (7)$$

$$M_t - l_{\alpha}(F_d - F_a) - F_{\alpha}l_{\alpha} - l_{CB}\sum F_{sp,i} + \sum_i F_{sp,i}\{l_{\alpha} + l_{i,S}\sin(\theta_i + \beta)\} = 0 \quad (8)$$

여기서 고정부재의 축방향 체결위치 l_{CB} 및 오링의 위치 l_{α} 의 기준은 고정부재와 선회부재가 접하는 면이다. 전복각 α 가 작다면 오링의 반작용력 F_{α} 과 축방향으로의 스프링력 $F_{sp,i}$ 은 각각

$$F_{\alpha} = \alpha k_{\alpha} l_{\alpha} \quad (9)$$

$$\sum F_{sp,i} = \sum_i k\{\delta - \alpha(l_{\alpha} + l_{i,S}\sin(\theta_i + \beta))\} \quad (10)$$

이면 δ 는 고정부재가 초기 위치에서 축방향 밀봉력으로 인해 아래로 처진 변위이다.

한편 양 부재의 접촉점 Q 에서 R_{α} 는 μ 를 마찰계수라고 할 때 $R_{\alpha} = \mu R_{\alpha \alpha}$ 이므로 식 (6) 및 식 (7)에서부터

$$\sum F_{sp,i} = F_{t,k}\cos\beta - (f_s + F_{r,k})\sin\beta - F_{\alpha} + \mu(F_d - F_a - \sum F_{sp,i}) \quad (11)$$

을 얻을 수 있으며 이 식을 식(9) 및 식(10)과 함께 모멘트 평형식인 식(8)에 대입하면

$$M_t - l_{\alpha}(F_d - F_a) - \alpha k_{\alpha} l_{\alpha}^2 + k\sum[(\delta - \alpha(l_{\alpha} + l_{i,S}\sin(\theta_i + \beta))) \cdot (l_{\alpha} + l_{i,S}\sin(\theta_i + \beta))] - l_{CB}[F_{t,k}\cos\beta - (f_s + F_{r,k})\sin\beta] \quad (12)$$

$$- \alpha k_{\alpha} l_{\alpha} + \mu(F_d - F_a) - \mu k\sum[\delta - \alpha(l_{\alpha} + l_{i,S}\sin(\theta_i + \beta))] = 0$$

이 되고, 이 식을 전복각 $\alpha > 0$ 대하여 정리하면

$$\alpha = \frac{[M_t - l_{\alpha}(F_d - F_a) + k(l_{\alpha}\sum\delta + \delta l_{i,S}\sum\sin(\theta_i + \beta) - l_{CB}F_{t,k}\cos\beta - (f_s + F_{r,k})\sin\beta + \mu(F_d - F_a) - \mu k\sum\delta)]}{[k_{\alpha}l_{\alpha}^2 + 2kl_{SI}l_{\alpha}\sum\sin(\theta_i + \beta) + kl_{i,S}^2\sum\sin^2(\theta_i + \beta) + nkl_{i,S}^2 - k_{\alpha}l_{\alpha}l_{i,S}l_{CB} + \mu kl_{CB}\sum(l_{\alpha} + l_{i,S}\sin(\theta_i + \beta))]} \quad (13)$$

과 같이 된다. 여기서 리프스프링의 체결을 등간격으로 하면 $\sum\sin(\theta_i + \beta) = 0$ 이 되고, $\sum\sin^2(\theta_i + \beta) = c_1$ 로 놓으면 (c_1 은 상수), 고정부재의 전복각 α 는 결국 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{[M_t - l_{\alpha}(F_d - F_a) + kl_{\alpha}\sum\delta - l_{CB}(F_{t,k}\cos\beta - (f_s + F_{r,k})\sin\beta + \mu(F_d - F_a) - \mu k\sum\delta)]}{[k_{\alpha}l_{\alpha}(l_{\alpha} - l_{CB}) + k(c_1l_{i,S}^2 + nl_{\alpha}^2 + \mu nl_{CB}l_{\alpha})]} \quad (14)$$

여기서 $\alpha > 0$ 이 되는 조건, 즉 고정부재의 전복이 발생하는 조건을 찾으려면, 이 식의 분모가 양 (+)일 때 분자도 양이든지, 아니면 이 식의 분모가 음 (-)일 때, 분자도 음이되면 된다.

먼저 식(14)의 분모가 양 (+)이 되는 조건은 식 (15)와 같으며

$$l_{CB} < l_{\alpha} \frac{1 + (k/k_{\alpha})(c_1(l_{i,S}/l_{\alpha})^2 + n(l_{\alpha}/l_{\alpha})^2)}{1 - \mu n(k/k_{\alpha})(l_{\alpha}/l_{\alpha})} \quad (15)$$

분자 또한 양이 되기 위해서는

$$l_{CB} < \frac{M_t - l_{\alpha}(F_d - F_a) + kl_{\alpha}\sum\delta}{F_{t,k}\cos\beta - (f_s + F_{r,k})\sin\beta + \mu(F_d - F_a) - \mu k\sum\delta} \quad (16)$$

을 만족하면 된다. 이 식을 정리하면 식(17)과 같다.

$$l_{CB} < \frac{\frac{h}{2\cos^2\beta} - l_{\alpha}\frac{F_{real}}{F_{t,k}\cos\beta}}{1 - \frac{f_s + F_{r,k}}{F_{t,k}}\tan\beta + \mu\frac{F_{real}}{F_{t,k}\cos\beta}} \quad (17)$$

한편 식(14)의 분모가 음 (-)이 되는 경우는

$$l_{CB} > l_{or} \frac{1 + (k/k_{or}) \{ c_1 (l_{LS}/l_{or})^2 + n (l_{en}/l_{or})^2 \}}{1 - \mu n (k/k_{or}) (l_{en}/l_{or})} \quad (18)$$

이고, 식(14)의 분자 역시 음(-)이 되려면

$$l_{CB} > \frac{\frac{h}{2\cos^2\beta} - l_{en} \frac{F_{seal}}{F_{tg}\cos\beta}}{1 - \frac{f_s + F_{rg}}{F_{tg}} \tan\beta + \mu \frac{F_{seal}}{F_{tg}\cos\beta}} \quad (19)$$

를 만족하게 된다. 따라서 고정부재의 시계방향으로의 전복이 일어나는 조건은 식 (15)와 식 (17)이 나타내는 공통영역과 또는 식 (18)과 식 (19)가 나타내는 공통영역에 해당한다. 그런데 식 (15)와 식 (17)의 공통영역은 식 (17)에 해당하며, 식 (18)과 식 (19)가 나타내는 공통영역은 식 (18)에 해당하므로 결국 고정부재가 전복모멘트의 영향을 받아 전복되는 조건은 식 (17)이나 또는 식 (18)의 조건이 되며 전복각의 크기는 식 (14)와 같다. 전복모멘트는 항상 양(+)이므로 고정부재가 시계방향으로 전복되는 경우는 일어나지 않는다. 고정부재의 전복이 발생하지 않는 영역은 위에서 얻은 영역이 외의 영역에 해당하므로 식 (20)과 같이 된다.

$$l_{or} \frac{1 + (k/k_{or}) \{ c_1 (l_{LS}/l_{or})^2 + n (l_{en}/l_{or})^2 \}}{1 - \mu n (k/k_{or}) (l_{en}/l_{or})} > l_{CB} > \frac{\frac{h}{2\cos^2\beta} - l_{en} \frac{F_{seal}}{F_{tg}\cos\beta}}{1 - \frac{f_s + F_{rg}}{F_{tg}} \tan\beta + \mu \frac{F_{seal}}{F_{tg}\cos\beta}} \quad (20)$$

즉 식(20)에서 나타내는 영역내에서 고정부재를 리프스프링이나 원통부시를 통해 압축기 프레임에 체결할 경우 전복모멘트의 영향에도 불구하고 고정부재는 전혀 전복되지 않는다. 식(20)에서 l_{or} , l_{en} , l_{LS} 들은 비슷한 크기로 $O(l_{en}/l_{or}) \sim 1$, $O(l_{LS}/l_{or}) \sim 1$ 로 간주할 수 있으나, 리프스프링과 오링의 스프링 상수는 통상 $k \ll k_{or}$ 이므로 l_{en} 의 상한을 고지적으로 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$l_{or} \frac{1 + (k/k_{or}) \{ c_1 (l_{LS}/l_{or})^2 + n (l_{en}/l_{or})^2 \}}{1 - \mu n (k/k_{or}) (l_{en}/l_{or})} \simeq l_{or} \quad (21)$$

그러면 최종적으로 고정부재가 전복모멘트로부터 안정한 영역에 있을 수 있는 조건은 식 (22)와 같이 된다.

$$l_{or} > l_{CB} > \frac{\frac{h}{2\cos^2\beta} - l_{en} \frac{F_{seal}}{F_{tg}\cos\beta}}{1 - \frac{f_s + F_{rg}}{F_{tg}} \tan\beta + \mu \frac{F_{seal}}{F_{tg}\cos\beta}} \quad (22)$$

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 밀봉력 및 전복모멘트

이상의 해식을 R-22를 사용하는 에어컨용 3마력급 스크롤 압축기에 적용하여 계산을 수행하였다. 스크롤랩의 형상을 이루는 인볼루트 곡선의 기초원 반경은 2.04mm, 시작각 및 끝각은 각각 30°와 1205°이고, 랩의 높이는 25mm, 두께는 2.55mm이다. 압축실내의 압력 계산은 단열압축을 가정하여 크랭크각이 전진함에 따른 압축실 채적의 변화로부터 구하되 각 압력실간의 가스누설을 고려하였으며, 부재에 작용하는 가스력은 이러한 가스압 분포를 적분하여 얻었다. 스크롤 압축기에서 압력선도, 가스력, 누설량 등을 계상하는 방법은 참고문헌⁽²⁾⁻⁽⁷⁾에 자세히 나와 있다.

Fig.5는 Fig.3의 운전조건 #6에서 운전되는 스크롤 압축기의 고정부재에 작용하는 각종 힘들을 보여준다. 모든 힘들은 축방향 밀봉력인 F_{seal} 의 평

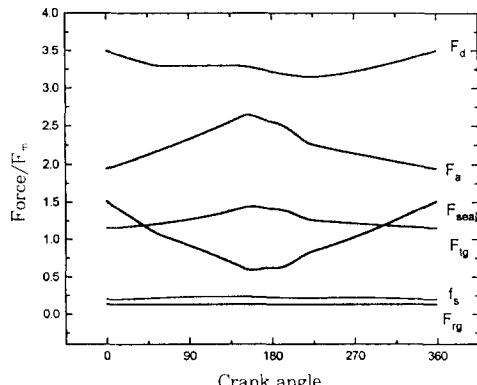


Fig.5 Various forces at operating condition #6

균값인 F_m 에 대해 무차원화 되었다. F_{seal} 이 크랭크 각의 변화에 대해 큰 변화를 보이는 것은 주로 축 방향 가스력 F_a 의 변화에 기인한다. 접선방향 가스력 F_{α} 에 비해 반경방향 가스력 F_r 는 작고, 반경방향 밀봉력 f 도 F_r 와 비슷한 수준이다. 이런 반경방향 힘들은 크랭크핀의 구동면각을 변화하여 그 크기를 조절할 수 있다.⁽⁸⁾

이러한 힘들을 이용하여 식(2) (3) (4) (5)로부터 전복모멘트 및 모멘트 작용 방향각을 구하였고, 그 결과를 Fig.6에 나타내었다. 여기서 각 모멘트는 전 모멘트의 평균치인 M_m 으로 무차원화되었다. 전복모멘트 방향각 β 는 $\beta < 4^\circ$ 이고, M_θ 는 M_m 에 비해 상당히 작아서, $M_t \geq M_m$ 으로 나타났다. 이러한 작은 값의 전복모멘트 방향각은 고정부재의 전복방향과 x_s 축 방향이 거의 일치함을 의미한다.

그런데 이러한 전복모멘트에 의해 고정부재가 실제로 전복각을 갖고 기울어서 고정부재의 한쪽 끝단이 선회부재로부터 벌어지게 되는 경우가 발생하는가의 여부는 고정부재를 압축기 프레임에 채결해 주는 체결부위의 축방향 위치 l_{ch} 와 밀접한 관계를 가지고 있다.

3.2 체결위치

앞서 구한 힘들을 식(22)에 대입하면 고정부재의 안정된 체결위치를 나내는 l_{ch} 의 영역을 구할 수 있다. 그런데 식(22)에 대입된 각종 힘들은 운

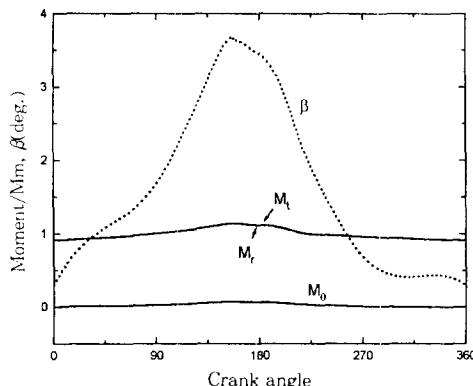


Fig.6 Overturning moments and direction angle β

전조건에 따라 변화하므로 l_{ch} 의 영역 역시 운전조건에 따라 변화하게 된다.

식(22)의 각종 힘들 가운데서도 축방향 밀봉력 F_{seal} 이 l_{ch} 의 영역 결정에 가장 큰 영향을 미치므로 이를 각 운전조건에서 살펴보았다. Fig.7은 이같은 운전조건에 따른 축방향 밀봉력의 변화를 보여준다. 각 번호들은 Fig.3의 각 운전조건을 나타낸다. 운전조건의 변화에 따라 축방향 밀봉력도 큰 변화를 보이는데, 토출압이 낮고 흡입압은 높은 운전조건 #1의 경우 밀봉력이 제일 작으며 $95^\circ < \theta < 180^\circ$ 에서는 심지어 음(−)의 값을 갖는다.

Fig.8은 l_{ch} 의 영역들을 여러 운전조건에 대해

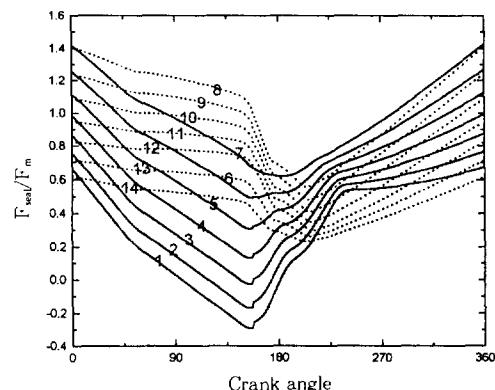


Fig.7 Axial sealing force at various operating conditions

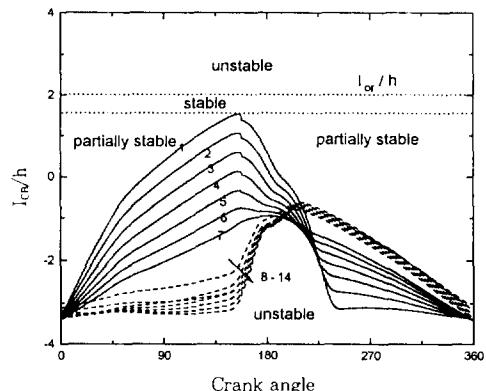


Fig.8 Stable suspension range for no tipping motion of the fixed scroll

보여준다. 고정부재가 전복모멘트의 영향에도 불구하고 전복되지 않는 안전영역의 하한은 축방향 밀봉력이 제일 작은 운전조건 #1에 의해 결정되며, 안전영역의 상한은 운전조건의 변화에 무관하게 단지 오링의 체결위치 l_{ch} 에 의해 결정된다.

안전영역의 하한은 주어진 운전조건에서는 크랭크각에 따라 변화하는데, 이는 식(22)에 계재된 각종 힘들이 운전조건 및 크랭크각에 따라 변화하기 때문이다. 따라서 모든 운전조건에서도 항상 안정한 l_{ch} 의 영역은 각 운전조건이 주는 안정영역의 최소 공통영역이 된다. Fig.8의 이러한 안정(stable)영역내에 고정부재의 체결위치를 설정하면 모든 운전조건하에서 크랭크각에 관계없이 항상 고정부재는 기울지 않는다.

체결위치 l_{ch} 의 하한쪽 안정영역은 축방향 밀봉력 F_{scal} 이 클 수록, 그리고 고정부재의 스크롤랩 외곽반경 f_s 이 클수록 넓어진다. 반경방향의 힘들 F_r , f_s 는 그 자체의 크기가 접선방향 가스력 F_{tg} 에 비해 작고 또 전복모멘트 방향각 β 가 작아서 체결위치에 주는 영향은 작다. 스크롤랩 외곽반경에 상응하는 길이 l_{ch} , 그리고 각종 가스력 F_{tg} , F_r 등의 크기와 반경방향 밀봉력 f_s 가 대략 정해지거나 계산되므로 실제로 체결위치 l_{ch} 의 안정영역 하한선을 조절할 수 있는 변수로는 단지 축방향 밀봉력 F_{scal} 만이 남게된다. 이 축방향 밀봉력을 배압설 면적이나 고정부재가 토출실에 노출되는 면적을 조절함으로 조절할 수 있다.

축방향 밀봉력이 음(−)이 되지 않는 한에는 안정영역의 하한은 적어도 $l_{ch} \approx h/2$ 가 된다. 식(22)의 하한치에서 β 와 μ 가 작고 축방향 밀봉력을 작아야 $F_{scal}/F_{tg} \approx 0$ 이므로 분모는 1에, 분자는 $h/2$ 에 접근하기 때문이다. Fig.7과 Fig.8을 비교해 볼 때, 축방향 밀봉력의 최소치가 0에 근접하는 운전 조건 #3에서 $l_{ch} \approx h/2$ 이 된다. 따라서 축방향 밀봉력을 모든 크랭크각에서 항상 양(+)이 되도록 하는 한에 있어서는 고정부재의 체결 안정영역을 $l_{ch} > l_{ch} > h/2$ 에서 확보할 수 있다.

Caillat, et al.⁽¹⁰⁾에서는 체결위치가 $l_{ch} = h/2$ 에서 고정부재가 안정될 수 있다고 주장하였다. 이들은 단순히 전복모멘트가 거의 전적으로 접선방향의 가스력 F_{tg} 에 영향을 받으므로 이러한 힘의 영향을

상쇄하기 위해서는 이 힘의 작용점의 위치가 랩의 중앙인 $h/2$ 임에 착안하여 체결위치 역시 랩의 중앙을 통과하는 선상에 오도록 해주면 될 것으로 여겼다. Fig.8에서 고정부재 체결위치를 랩의 중간 높이에 잡아주었다면 운전조건 #3~#14의 경우에는 고정부재의 전복이 발생하지 않으나 운전조건 #1 및 #2에서는 일부 크랭크각 구간에서 전복이 발생하게 됨을 볼 수 있다.

참고문헌⁽¹⁰⁾에서는 고정부재에 미치는 모든 힘과 모멘트의 평형으로부터 고정부재 체결위치 l_{ch} 의 안정영역을 구하였는데, 고정부재의 전복가능성을 고려함에 있어 시계방향과 반시계방향의 전복가능성 모두를 고려하였다. 하지만 전복모멘트 방향각이 모든 크랭크각에서 항상 반경방향 축(x_c)에 거의 일치하므로 시계방향의 전복 가능성은 일어나지 않는다. 이러한 차이는 식(22)의 l_{ch} 의 안정영역 상한에 차이를 가져온다. 또한 참고문헌⁽¹⁰⁾에서는 전복모멘트의 접선방향 성분이 반경방향 성분에 비해 작으므로 $M_t \approx M_r$ 및 $\beta \approx 0^\circ$ 으로 간주하여, 다만 반경방향의 전복모멘트만을 고려하였다. 그런데 식(22)의 l_{ch} 의 하한치에 $\beta = 0^\circ$ 을 대입하면 $(h/2 - l_{ch} F_{scal}/F_{tg})/(1 + \mu F_{scal}/F_{tg})$ 가 되어 참고문헌⁽¹⁰⁾의 식 (17)과 비교하였을 때 분모의 둘째항의 부호가 다름을 알 수 있다. 이는 고정부재와 선회부재의 접촉점(Fig.4의 Q점)에서 고정부재가 선회부재로부터 받는 y 방향 마찰력을 본연구에서는 참고문헌⁽¹⁰⁾에서 와는 반대로 선회부재의 운동방향과 같은 방향으로 잡아주었기 때문이다.

3.3 전복각과 압축기 효율

고정부재의 체결위치가 부적절히 설정되어 Fig.8의 부분안정영역에 속할 경우, 고정부재의 전복이 압축기의 성능에 끼치는 영향을 조사해 보고자 한다. 일단 전복이 일어나면 전복각은 식 (14)로부터 구할 수 있다. 부분안정의 체결위치에서는 고정부재의 자세가 실제로는 크랭크각에 따라 전복상태에 놓이기도, 또는 안정상태에 놓이기도 하지만 계산의 단순화를 위해 평균적인 개념으로 고정부재의 전복각이 일정하다고 간주한다.

Fig.9는 ASHRAE 표준냉방 조건에서 전복각의 증가에 따라 구한 스크롤 압축기의 체적효율과 단

열압축효율의 변화를 보여준다. 이와 같은 전복각으로 인해 일어나는 고정부재가 선회부재로부터 벌어지는 축방향 최대 거리는 $\alpha=0.03^\circ$ 에서 $36\mu m$ 에 상당하며, 각 효율은 전복이 일어나지 않는 $\alpha=0.0^\circ$ 인 경우의 체적 및 단열압축 효율에 대한 상대적인 값이다. 전복각 $\alpha=0.013^\circ$ 이하에서 상대효율이 1에 접근하는 이유는 전복으로 인한 축방향 평균 간극이 전복이 일어나지 않더라도 기본적으로 존재하는 축방향 간극과 같은 수준이 되기 때문이다. 전복각이 증가할수록 체적효율 및 단열압축효율은 급격히 감소하여 전복각 $\alpha=0.03^\circ$ 에서 상대적인 체적효율 및 상대 단열압축효율은 각각 23.9

% 및 27.1% 감소한다.

전복각 $\alpha=0.02^\circ$ 및 $\alpha=0.03^\circ$ 에서의 p-V선도를 $\alpha=0.0^\circ$ 에서의 p-V선도와 Fig.10에 비교하였다. 전복각이 훨씬 압축과정 전반부에서 가스압이 높게 나타나고, 압축과정 후반부에서는 반대로 압력이 낮아지는데 이는 큰 전복각에서 고압측 압축실로부터 저압측 압축실로의 누설이 상대적으로 많아지기 때문이다.

7. 결 론

축방향 기밀성을 향상시키기 위한 목적으로 고정부재의 배면에 배압실을 설치하여 가스력을 이용하여 고정부재를 선회부재쪽으로 밀어주는 구조를 갖는 스크롤 압축기에서 고정부재의 안정성에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 축방향 순응하는 고정부재가 전복모멘트의 영향을 받지 않도록 해주는 체결위치, 즉 고정부재와 압축기 프레임과의 체결부 높이에 대한 안정영역을 해석적으로 구하였다. 이러한 체결위치의 식(22)로 표현된다.

2) 축방향 밀봉력을 모든 크랭크각에서 항상 0보다 크게 해준다면 고정부재체결 안정영역을 최소한도 $l_{cr} > l_{ch} > h/2$ 과 같이 확보할 수 있다. 즉 고정부재와 배압실간의 누설방지를 위한 오링 설치위치와 스크롤랩 높이의 중간지점과의 사이에 고정부재의 체결위치를 잡아주면 고정부재는 전복되지 않게 된다.

3) 일단 고정부재가 기울어 지게 되는 경우, 그 전복각의 크기는 식(14)에서 얻을 수 있으며, 스크롤 압축기는 작은 전복각에서도 체적효율 및 단열압축효율 등의 압축기 성능에 큰 손실을 입는다. 주어진 고정부재의 치수에서 전복각을 작게 하려면 오링의 스포링 상수를 크게 해 주면 된다.

참 고 문 헌

- Nieter, J. J., 1990, "Dynamics of Compliance Mechanisms in Scroll Compressors, Part I :Axial Compliance", Proc. of Intern. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 308~316.

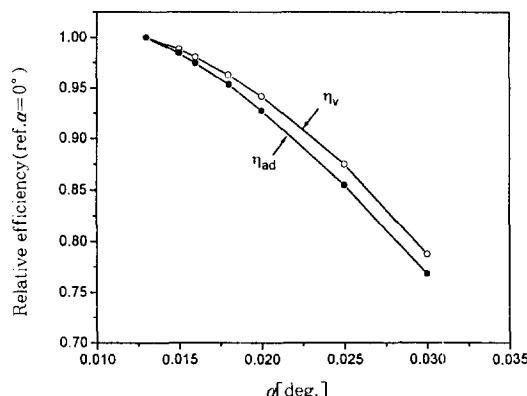


Fig.9 Effect of fixed scroll tilting on volumetric and adiabatic efficiencies

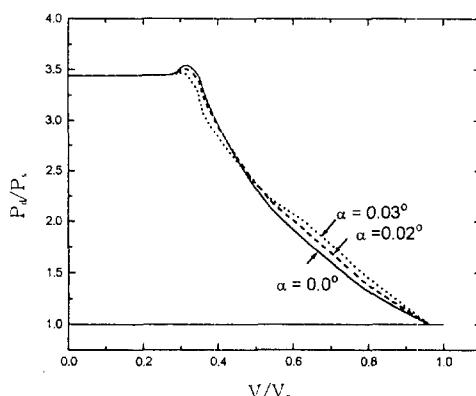


Fig.10 Effect of fixed scroll tilting on p-V diagram

2. Morishita, E., Sugihara, M., Inaba, T., Nakamura, T., and Works, W., 1984, "Scroll Compressor Analytical Model," Proc. of Intern. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 487~495.
3. Tojo, k., Ikegawa, M., Maeda, N., Machida, S., and Shiibayashi, M., 1986, "Computer modelling of scroll compressor with self adjusting back pressure mechanism", Proc. of Intern. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 872~886.
4. Inaba, T., Sugihara, M., Nakamura, T., Kimura, T., and Morishita,, E., 1986, "Scroll compressor with sealing means and low pressure side shell", Proc. of Intern. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp.887~900.
5. Ishii, N., Fukushima, M., Sano, K., and Sawau, K., 1986, "A study on dynamic behavior of a scroll compressor", Proc. of Intern. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 901 ~916.
6. Chen, Q., 1994, "The influence of leakage on the performance of scroll compressor with self adjusting back pressure mechanism", Proc. of Intern. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 211~216.
7. 김현진, 윤탁, 안영재, 이건호, 김태종, 김진영, 1993, "에어컨용 고효율 scroll compressor의 설계 및 제작기술 개발에 관한 연구", 상공자원부 보고서, KAITECH-BS-PKR92810.
8. 김중현, 김선영, 이원학, 임금식, 김현진, 1995, "스크롤 압축기의 램간 접촉력 조절에 관한 연구", 공기조화 냉동공학 하계학술발표논문집, pp. 341~347.
9. Caillat, J. M., Weatherston, R. C., and Bush, J. W., 1988, "Scroll type machine with axially compliant mounting", U. S. Patent No. 4, 767, 293.
10. 김현진, 정도영, 김중현, 김선영, 이원학, 임금식, 1994, "스크롤 압축기의 누설감소를 위한 고정부재 체결위치 해석", 공기조화 냉동공학 동계학술발표논문집, pp. 185~190.