

부채꼴형 패드 베어링의 최적설계를 위한 성능특성 해석

최장운* · 김종철* · 안종권* · 김종수**

An Analysis of Performance Characteristics for Optimum Design of Sector – Shaped Pad Bearings

Choi Jang – Woon, Kim Jong – Cheol, Ahn Jong – Kwon, Kim Jong – Soo

Abstract

A numerical analysis is carried out to obtain the performance characteristics for the optimum design in pad bearings. The maximum available unit load capacity for a given pad configuration is investigated using a proper numerical technique and the friction torque parameter, the pivot position and the ratio of film thickness are calculated. These performance parameters are also obtained to various pad configurations. The numerical results show that an optimum pad configuration(aspect ratio) to maximize the unit load capacity and to minimize the friction torque parameter exists respectively. The pivot position for the maximum available unit load capacity is largely varied with the change of the pad configuration. The present results are available for the optimum design in fixed pad and tilting pad thrust bearings.

기호설명

A : 패드의 면적, $\beta(R_2^2 - R_1^2)/2$

C_f : 마찰토오크 계수, $(R_1 F_t) / (h_1 W)$

F_t : 마찰 토오크

* 한국해양대학교 기계공학과

** 한국해양대학교 기계공학과 전임강사

- h : 유막 두께
 h_1 : 최소유막두께
 h_2 : 베어링 입구의 유막두께
 \bar{h} : 무차원 유막두께, h/h_1
 H_r : 평균반경에서의 유막두께비, h_2/h_1
 m_p : 무차원 피칭 파라미터, $(R_1/h_1)\alpha_p$
 m_r : 무차원 롤링 파라미터, $(R_1/h_1)\alpha_r$
 p : 유막 압력
 \bar{p} : 무차원 유막압력, $\frac{h_1^2}{\mu R_1^2 \omega} p$
 P_m : 무차원 단위 부하능력, $\frac{h_1^2}{A \mu R_1^2 \omega} W$
 r : 패드의 반경 방향 좌표
 r_p : 반경 방향의 피봇 위치
 \bar{r} : 패드의 무차원 반경 방향 좌표, r/R_1
 r_p : 무차원 반경 방향 피봇위치, $(r_p/R_1 - 1)/(R - 1)$
 R_1 : 패드의 내경
 R_2 : 패드의 외경
 R : 패드의 반경비, R_2/R_1
 R_t : 패드 형상비, $\frac{2(R_2 - R_1)}{(R_2 + R_1)\beta}$
 W : 부하 능력
 α_p : 패드의 피칭각
 α_r : 패드의 롤링각
 μ : 윤활유 점도
 ω : 회전원판의 각속도
 β : 패드 형상각
 θ : 패드의 원주방향 좌표
 θ_p : 원주방향의 피봇위치
 $\bar{\theta}_p$: 무차원 원주방향 피봇위치, θ_p/β

1. 서 론

일반적으로 추력베어링은 고정식과 피봇식으로 크게 2가지의 형식으로 나눌 수 있다. 추력편

(Pad)을 사용하는 피봇식 추력베어링은 피봇점을 중심으로 패드가 자유로이 기울어질 수 있으므로 피봇의 위치가 압력중심이 된다. 고정식 추력베어링과 같이 베어링의 기울임 각도가 일정한 경우, 유막두께가 변함에 따라 유막두께 비가 달라져서 부하능력에 큰 변동을 가져오게 된다. 그러므로 어느 정도 하중 지지능력을 가지지만 효율 구간내를 벗어나면 비효율적인 운전이 된다. 따라서 큰 하중을 요하는 곳이나 변동하중을 받는 곳에서는 고정식 보다는 피봇식 추력베어링 유리하다. 그러나 피봇식 추력베어링은 제작상의 어려움과 경제성면에서 고정식보다 불리하며 일반적으로 저하중용으로는 고정식이 많이 사용되고 있다. 이와같은 추력을 받는 미끄럼 베어링에서는 일정한 최소유막두께에 대한 하중지지능력은 베어링의 후미부 유막두께에 대한 선단부 유막두께의 비율에 크게 의존한다. 또한 부채꼴형 패드의 형상에 따라서도 이용가능한 단위면적당 부하능력이 크게 달라진다. 지금까지 부채꼴 모양의 추력식 패드베어링에 대해 수 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대부분의 연구가 유막에서의 관성력, 온도상승 및 패드의 변형이 베어링의 성능에 미치는 영향을 조사하는 것이었다. 그렇지만 패드 형상비에 따라서도 단위면적당 부하능력은 상당한 영향을 받게 됨으로 여러가지 패드형상에 따른 성능해석이나 보다 광범위한 패드형상에 대한 설계도표를 제시하는 연구가 필요 하지만 그러한 별로 수행된 바가 없다.

Bosma¹⁾는 사각형 패드에 대해 출구측 유막두께와 마찰토오크에 대한 무차원 변수를 사용하여 피봇 위치와 패드의 길이와 폭의 비율에 대한 설계 도표를 구하였고, 부채꼴형 추력베어링의 설계에 적용한 예가 있다. 그러나 사각형 패드에 대한 설계도표를 사용하여 부채꼴 추력베어링에 대한 설계를 하는 것은 적합하지가 않다. Etsion^{2,3)}은 부채꼴 모양의 패드에 대한 설계도표를 구하였으며, 패드의 출구에서의 유막두께가 회전원판의 표면과 평행을 이를때 부하능력이 최대가 된다고 주장하였다. 그러나 패드의 형상이 별로 많지 않아 실제 상용되는 패드형상에 대한 설계도표로서는 부족한 것으로 생각되고, 압력중심을 구하는 방법에는 문제가 있는 것으로 생각된다. Singh⁴⁾는 반경 방향으로 균일화된 유막두께식을 사용하여 패드 중앙부의 원호 길이와 반경방향 패드폭의 비(패드형상비)에 대하여 계산을 함으로써 보다 많은 패드형상을 포함할 수 있음을 주장하였다. 그러나 Singh이 사용한 유막두께식으로는 일반적으로 많이 사용되는 평면 부채꼴형 추력베어링에 대해서는 사용이 어렵다.

실제 사용되는 추력베어링은 그 운전조건에 따라 베어링 입구에서의 선단압력과 유막에서의 온도상승, 패드의 변형등이 베어링 성능에 미치는 중요한 인자가 될수 있다. 그러나 저속 경하중용의 경우에는 이와같은 인자들이 미치는 영향은 상대적으로 적고, 따라서 등점도 유체윤활이론에 의한 해석결과로부터 유용한 베어링의 설계가 가능하다. 본 연구에서는 선단압력과 온도상승 등을 고려하지 않는 등점도 유체윤활이론을 이용하여 패드의 형상에 따른 이용가능한 베어링의 최대성능을 해석하여 패드베어링 설계시 최적의 패드형상을 선정하기 위한 자료를 제공하고자 한다. 이를 위하여 광범위한 패드형상에 대하여 최대 단위 부하능력을 갖는 조건들을 조사하고 그때의 유막두께비, 피봇위치 및 마찰토오크 등 전체적인 성능특성을 구한다.

2. 기본 방정식

일반적인 유체윤활 베어링에서는 압력지배 방정식인 레이놀즈 방정식을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 사용한다.

- 1) 체적력은 무시한다.
- 2) 유막두께 방향의 압력구배는 무시 할 수 있을 정도로 작다.
- 3) 윤활제는 뉴우튼 유체이다.
- 4) No-Slip 조건을 만족한다.
- 5) 윤활제의 유동은 층류이다.
- 6) 윤활제의 관성력은 무시한다.
- 7) 윤활제의 점도는 일정하다.

위의 가정을 사용하여 Fig. 1과 같은 부채꼴형 패드 베어링에 대해서 압력지배 방정식인 레이놀즈 방정식을 유도하면 다음 식으로 정리된다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(rh^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 6\mu r \omega \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (1)$$

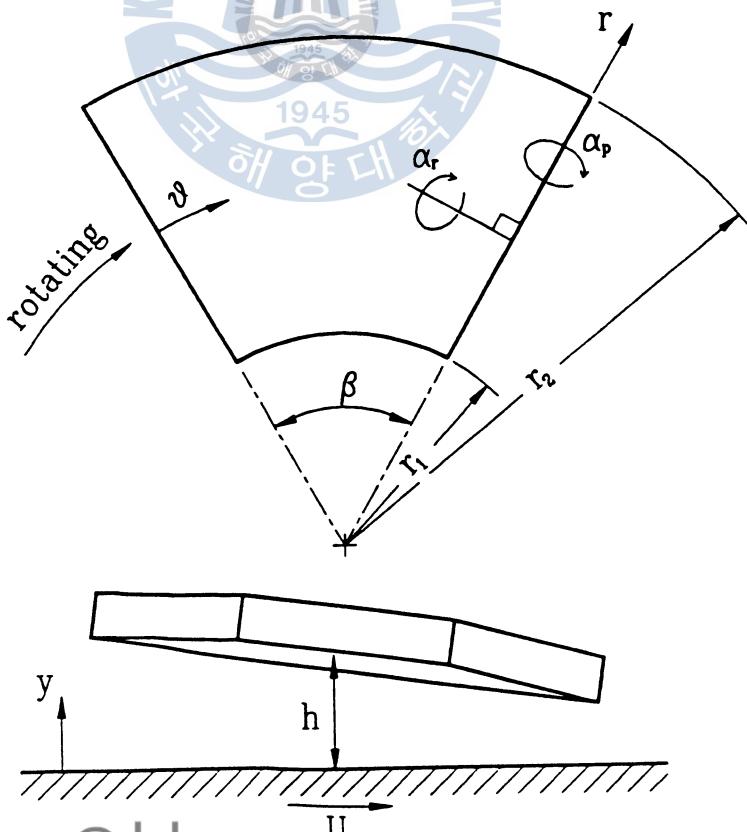


Fig. 1 Geometry and coordinate system of a sector-shaped pad

위식을 무차원화 하면 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) = 6\bar{r} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} \quad (2)$$

여기서 무차원 유막두께식은 다음과 같이 표시된다.

$$\bar{h} = 1 + \bar{r} \sin(\beta - \theta) m_p + (R - \bar{r} \cos(\beta - \theta)) m_r, \quad (m_r \geq 0) \quad (3-a)$$

$$\bar{h} = 1 + \bar{r} \sin(\beta - \theta) m_p + (1 - \bar{r} \cos(\beta - \theta)) m_r, \quad (m_r < 0) \quad (3-b)$$

압력 경계조건은 패드의 모든 경계에서 대기압으로 가정한다.

즉,

$$\bar{p}(1, \theta) = \bar{p}(R, \theta) = \bar{p}(\bar{r}, 0) = \bar{p}(\bar{r}, \beta) = 0 \quad (4)$$

3. 수치 해석

무차원 레이놀즈방정식(2)으로 부터 무차원압력을 구하기 위하여 수치해석이 필요하며, 유한차분법(F. D. M)을 사용하기로 한다. Fig. 2는 부채꼴형 패드에서의 차분화 형태를 나타내고 있으며, 임의의 P점에 대한 차분화된 레이놀즈방정식은 식(2)로 부터 다음과 같이 된다.

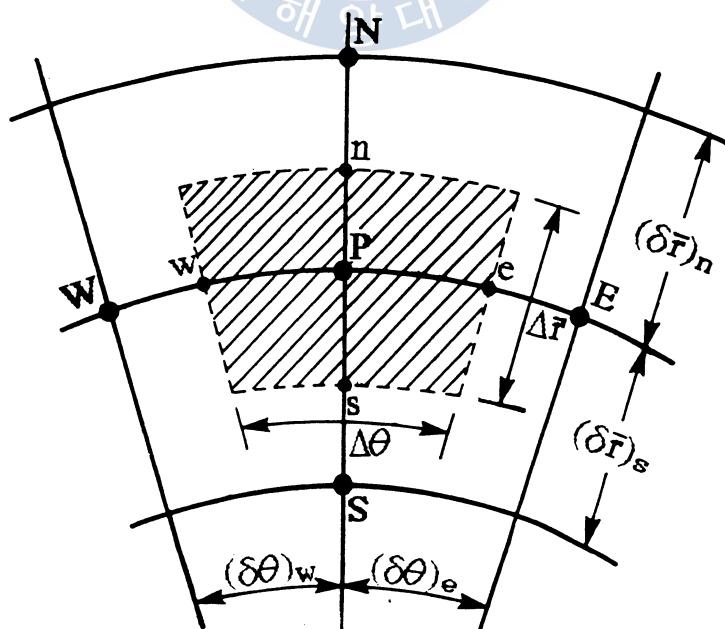


Fig. 2 grid element for numerical solutions

$$A_p \bar{p}_p = A_N \bar{p}_N + A_S \bar{p}_S + A_E \bar{p}_E + A_W \bar{p}_W + S_p \quad (5)$$

여기서,

$$A_N = \frac{(\bar{r} \bar{h}^3)_n}{\Delta \bar{r} (\delta \bar{r})_n}, A_S = \frac{(\bar{r} \bar{h}^3)_s}{\Delta \bar{r} (\delta \bar{r})_s}, A_E = \frac{(\bar{h}^3)_e}{\bar{r}_p \Delta \theta (\delta \theta)_e}$$

$$A_W = \frac{(\bar{h}^3)_w}{\bar{r}_p \Delta \theta (\delta \theta)_w}, S_p = -6 \bar{r}_p \frac{(\bar{h}_e - \bar{h}_w)}{\Delta \theta},$$

$$A_p = A_N + A_S + A_E + A_W$$

수치해를 구하기 위하여 사용된 격자수는 원주방향과 반경방향 모두 등간격으로 10등분 하였다. 본 연구에서 사용한 격자수는 큰 오차를 포함하지 않으면서 계산시간을 단축시킬 수 있다. 무차원 유막압력은 식(5)을 모든 격자점에 대하여 적용함으로써 얻어지며, 이때 무차원압력의 수렴판정기준은 다음과 같이 한다.

$$\text{MAX} \left(\frac{|\bar{p}_{i,j}^{k-1} - \bar{p}_{i,j}^k|}{|\bar{p}_{i,j}^k|} \right) \leq 10^{-4} \quad (6)$$

그리고 위식에서 상첨자 k는 반복계산 횟수를 의미한다. 무차원 유막압력이 구해지면 부채꼴형 추력베어링의 여러가지 성능인자들을 구할 수 있으며, 각각의 성능들은 다음 식들과 같이 표현된다.

무차원 단위 부하능력 :

$$\bar{P}_m = \frac{2}{\beta(R^2 - 1)} \int_1^R \int_0^\beta \bar{p} \bar{r} d\theta d\bar{r} \quad (7)$$

원주방향과 반경방향의 압력중심위치 :

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{\int_1^R \int_0^\beta \bar{p} \bar{r}^2 \sin \theta d\theta d\bar{r}}{\int_1^R \int_0^\beta \bar{p} \bar{r}^2 \cos \theta d\theta d\bar{r}} \right) \quad (8-a)$$

$$r_p = \frac{R_1}{\sin \theta_p} \frac{\int_1^R \int_0^\beta \bar{p} \bar{r}^2 \sin \theta d\theta d\bar{r}}{\int_1^R \int_0^\beta \bar{p} \bar{r}^2 d\theta d\bar{r}} \quad (8-b)$$

마찰토오크 계수 :

$$C_t = \frac{\int_1^R \int_0^\beta \frac{\bar{r}^3}{h} \left(1 + \frac{\bar{h}^2}{2\bar{r}^2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) d\theta d\bar{r}}{\int_1^R \int_0^\beta \bar{p} \bar{r} d\theta d\bar{r}} \quad (9)$$

위식들로 정의된 성능인자들을 구하기 위하여 심슨 수치적분법을 사용하였다. Fig. 3은 수치적으로 베어링의 유막압력을 구하기 위한 격자수의 변화에 따른 무차원 단위부하능력을 나타낸다. 격자

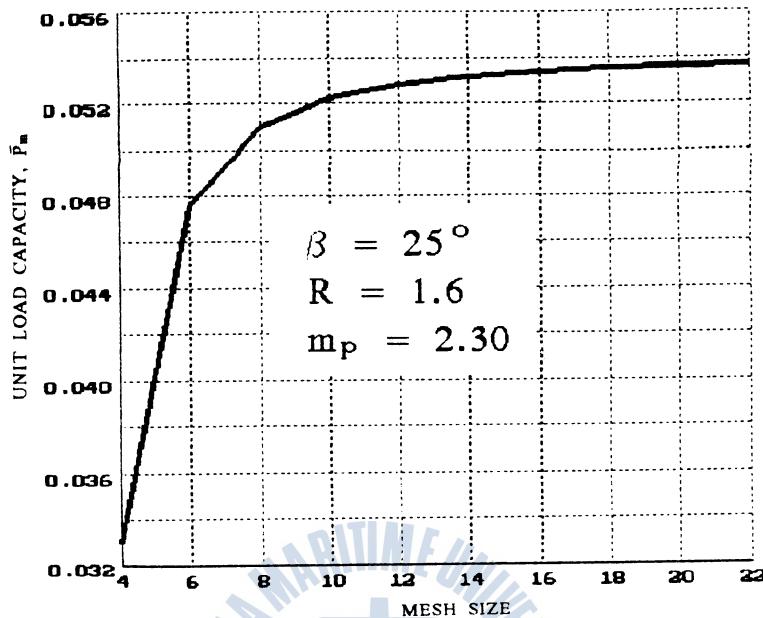
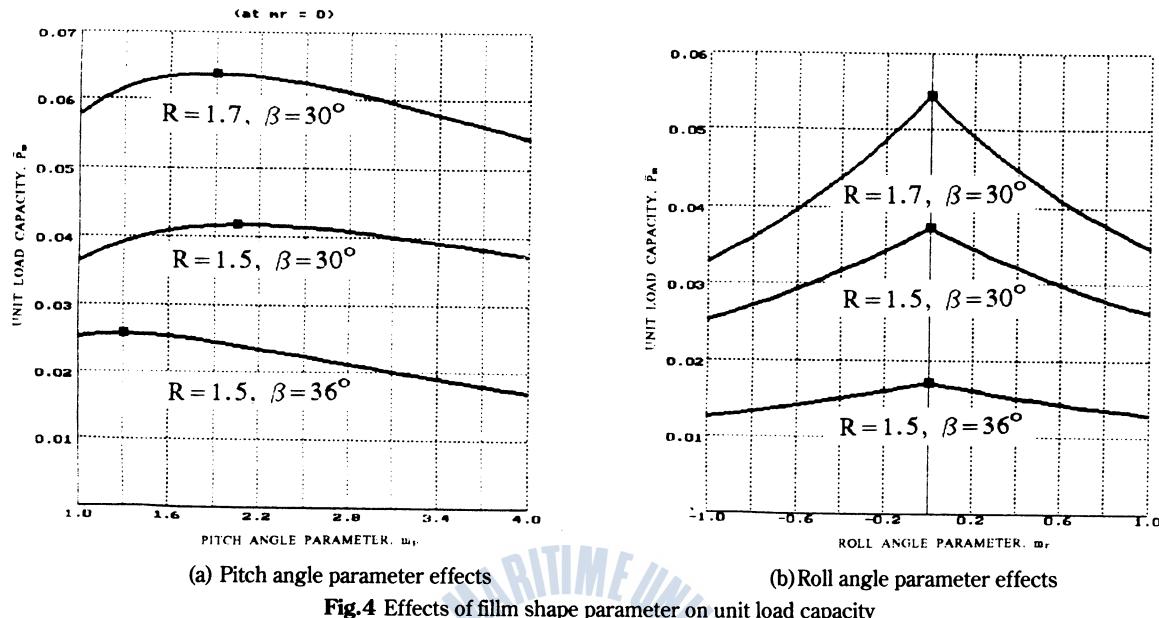


Fig. 3 Effects of mesh size on numerical solutions

수가 증가함에 따라 무차원 단위부하능력이 어떤 일정한 값에 수렴하고 있음을 보여주고 있다. 격자수가 18개 이상이면 무차원 단위부하능력의 크기는 거의 변하지 않으므로 정확한 값으로 볼수 있다. 그러나 격자수가 증가하면 계산시간도 함께 증가하게 된다. 격자수가 10인 경우에는 격자수가 22인 경우와 비교해서 2.7%정도의 적은 오차를 보이고 있는 반면 계산시간은 2배 이상 감소한다. 그러므로 본 연구에서 사용된 격자수는 본 연구의 목적을 달성하는데 있어서는 별 문제가 없다고 판단된다.

4. 결과 및 검토

부채꼴형 패드베어링은 유막의 두께비에 따라 베어링의 성능이 크게 변하며 유막두께비는 피칭파라미터 m_p 와 롤링파라미터 m_r 에 의해 결정된다. 그러므로 베어링의 성능을 최적으로 하는 피칭파라미터와 롤링파라미터가 존재하게 된다. Fig. 4(a)는 롤링파라미터 $m_r=0$ 일 때 피칭파라미터에 따른 단위부하능력을 나타내고 있다. 피칭파라미터가 증가함에 따라 단위부하능력도 증가하다가 어느 값 이상이 되면 다시 감소하고 있다. 그러므로 최대 단위부하능력을 갖게하는 피칭파라미터가 존재하며 그 값은 패드형상각과 반경비에 따라 다르다. 반면에 롤링파라미터를 변화시키고, 그 때의 최대 단위부하능력은 Fig. 4(b)에 나타내고 있다. 단위부하능력은 롤링파라미터에 따라서도 변하며, 그 변화 정도는 패드형상각과 반경비에 따라 달라진다. 또 단위부하능력을 최대로 하는 롤링파라미터의 값도 존재함을 보여주고 있다. 그렇지만 피칭파라미터와는 달리 단위부하능력을 최대로 하는 롤링파라미터는 패드형상각과 반경비에 무관하게 항상 $m_r=0$ 임을 보여주고 있다. 또한 최대 단위



부하능력의 크기는 패드형상각과 반경비에 따라 다르다. 그러므로 최적의 베어링 성능을 계산하기 위하여 롤링파라미터를 0으로 두고 단위부하능력을 최대로 하는 피칭파라미터 구한 후 그 때의 마찰 토오크계수, 압력중심, 유막두께비 등 베어링의 성능인자들을 여러가지의 패드형상에 대하여 계산을 함으로써 패드베어링의 최적설계가 가능하게 될 것이다. 이후의 모든 베어링의 성능은 위와 같은 조건 하에서 이루어 졌다.

Fig. 5(a),(b)는 반경비가 2.2이고 β 가 각각 30° , 60° 인 경우에 대한 베어링 유막에서의 3차원 압력 분포를 나타내고 있다. 패드형상각 크면 최대 유막압력의 위치가 상대적으로 패드의 후미부측으로 이동된다.

Fig. 6은 패드형상각과 반경비를 변화 시킬 때의 무차원 최대 단위부하능력을 나타내고 있다. 그리고 이후의 모든 그림에서 표시된 파선은 패드형상비(R_f)가 1인 곳을 나타내고 있다. 반경비가 증가 할수록 무차원 최대 단위부하능력이 증가함을 보여주고 있는데, 이는 단위부하능력을 무차원화 하는데 있어서 내경측의 속도를 기준으로 하고 있으므로 반경비가 증가하면 평균속도가 증가하는 효과를 갖게 되기 때문이다. 그리고 임의의 주어진 반경비에 대하여 최대 단위부하능력이 가장 크게 되는 패드형상각이 존재함을 알 수 있다. 그러한 패드형상각은 반경비에 따라서 달라지며 반경비가 증가하면 최대 단위부하능력을 가장 크게 하는 패드형상각도 증가하게 된다. 그러므로 최대 단위부하능력을 최대로 하는 즉, 부하능력에 대한 최적인 패드형상비 R_f 가 존재하게 되며, 그 값은 패드형상각과 반경비에 따라 약간씩 달라지나 본 연구의 패드형상 범위내에서는 대체로 0.95~1.13정도임을 알 수 있었다. 실제 상용되는 추력베어링 패드형상비는 1정도로 하는 경우가 많은데 이는 본 연구의 결과와 잘 일치하고 있다. 베어링 설계시에 단위부하능력을 최대로 하고자 한다면, 반경비가 주어지면 패드형상각이 결정되고 반대로 패드형상각이 주어진다면 반경비가 정해지게 되며, 그 관계

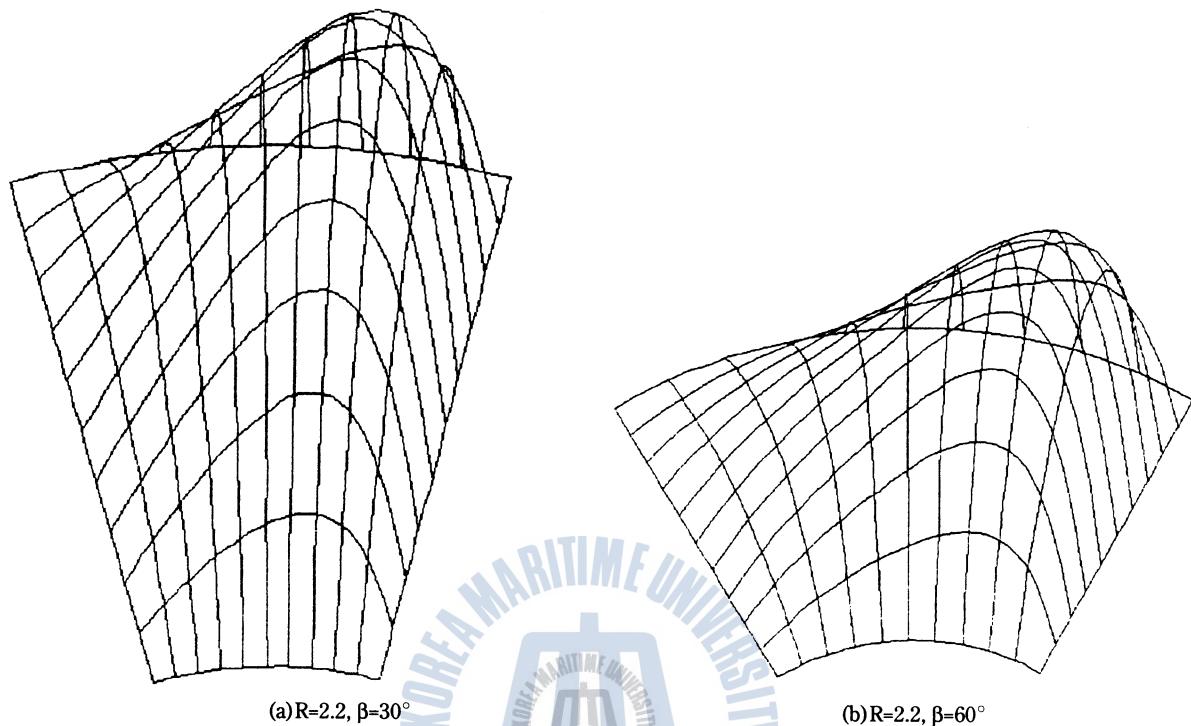


Fig. 5 Film pressure distribution

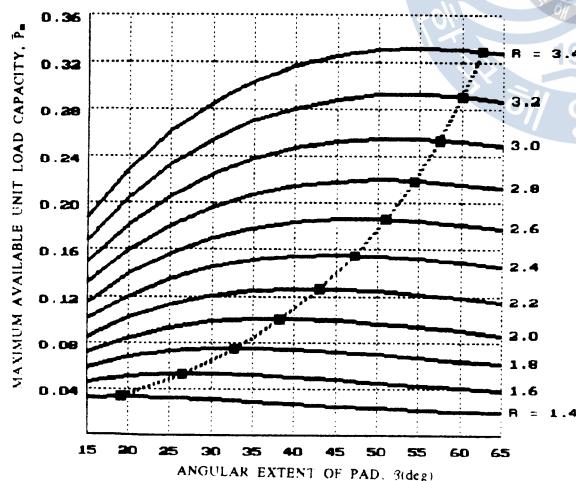


Fig. 6 Maximum available unit load capacity

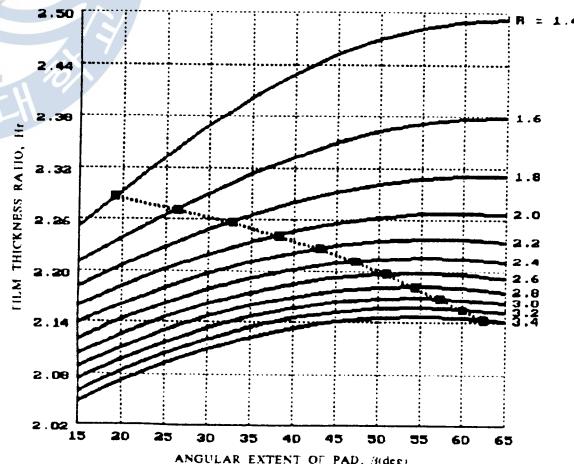


Fig. 7 Film thickness ratio for maximum available unit load capacity

는 Fig. 6에서 나타낸 패드형상각과 반경비의 결과를 이용하면 될 것이다.

Fig. 7은 최대 단위부하능력을 갖기 위한 패드의 평균반경에서 베어링의 윤활유막 입구와 출구측의 유막두께의 비를 반경비와 패드 형상각에 대하여 나타내고 있다. 반경비가 증가할수록 최대 단위부하능력을 갖기 위한 유막두께비는 감소하고 있다. 또 주어진 반경비에서 패드형상각이 증가하면 유막두께비도 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 최대 단위부하능력을 가장 크게하는 유막

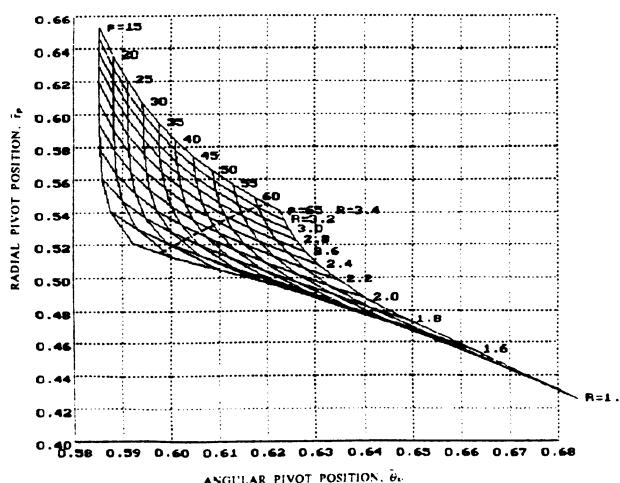


Fig. 8 Pivot position for maximum available unit load capacity

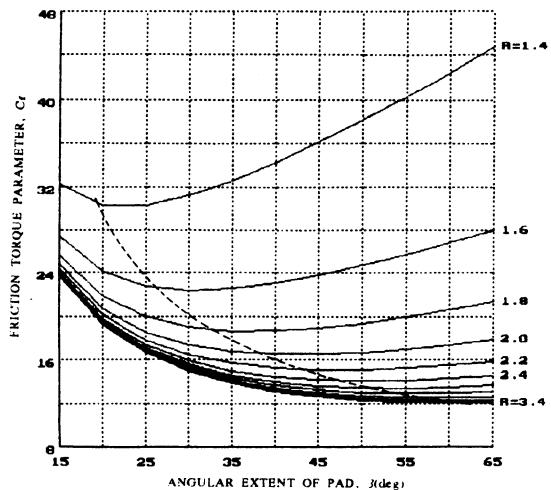


Fig. 9 Friction torque parameter in the condition of maximum available unit load capacity

두께비는 일정하지 않고 패드형상과 반경비에 따라 다르며 반경비가 증가할수록 최적의 유막두께비가 약간씩 감소하게 됨을 알 수 있다. 그리고 부하능력에 대한 최적인 패드형상에 대해서는 유막두께비를 2.1~2.3 정도로 하는 것이 적절함을 알 수 있다. 이 도표로부터 고정식 추력베어링을 제작하고자 할 때 최대 단위부하능력을 얻기 위하여 패드의 유행면의 형상을 어느 정도로 가공해야 할 것인지를 알 수 있을 것이다.

Fig. 8은 최대 단위부하능력을 발생시키는 조건에서 유막압력의 압력중심을 여러가지의 패드형상에 대하여 나타내고 있다. 이는 틸팅 - 패드형 추력베어링에서 단위부하능력을 최대가 되게하는 피봇점의 위치를 나타낸 것으로 볼 수 있다. 반경비 및 패드형상각의 변화에 대해 단위부하능력이 최대가 되는 피봇점의 위치가 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 반경비가 커질수록 반경방향의 피봇위치는 패드의 외경쪽으로 이동하며 원주방향의 피봇위치는 패드의 입구측으로 이동한다. 또 패드형상각이 증가하면 원주방향의 피봇위치는 패드의 후미부 쪽으로 이동하고 반경방향의 피봇위치는 패드의 내경쪽으로 이동된다. 패드형상각이 비교적 작은 경우에는 반경비의 변화에 의해서는 원주방향의 피봇위치의 변화가 적으나 패드형상각이 커질수록 반경비의 변화에 의하여 원주방향의 피봇위치의 변화의 폭이 상당히 증가하고 있다. 그러므로 틸팅 - 패드 추력베어링에서는 피봇위치가 베어링의 성능에 매우 민감하게 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 그리고 최대 단위 부하능력을 최대로 하는 패드형상에 대해서 최적인 피봇위치가 $\bar{\theta}_p=0.60\sim0.62$, $\bar{r}_p=0.52\sim0.54$ 정도이다.

Fig. 9는 마찰토오크계수를 반경비와 패드형상각에 대하여 나타내고 있다. 반경비가 증가하면 마찰토오크계수가 감소한다. 그리고 주어진 반경비에 있어서 마찰토오크계수를 최소로 되게하는 즉, 마찰토오크에 관한 최적인 패드형상각이 존재함을 알 수 있다. 반경비가 커질수록 마찰토오크계수가 최소로 되는 패드형상각은 증가하고 있으며, 주어진 반경비에 대해 마찰토오크계수가 최소가 되게하는 패드형상과 최대 단위부하능력을 최대로 되게하는 패드형상과는 일치하지는 않으며 마

찰토오크계수를 최소로 하는 패드형상각이 약간 더 크다.

5. 결 론

상용되는 부채꼴형 추력 베어링의 모든 패드 형상을 수렴할 수 있는 광범위한 패드 형상에 대하여 단위부하능력을 최대로 되게하는 유막두께를 구하고 그 때의 베어링 성능을 계산 하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

(1) 일반적으로 무차원 최대 단위부하능력은 반경비가 커질수록 증가하고, 마찰토오크계수는 반경비가 증가할수록 감소한다.

(2) 주어진 반경비에 대해 부하능력에 관한 최적인 패드형상각과 마찰토오크에 관한 최적인 패드 형상각이 각각 존재하며, 그 때의 패드형상비는 단위부하능력에 대하여는 0.95~1.13, 마찰토오크계수에 대하여는 0.85~1.0정도이다.

(3) 단위부하능력을 최대로 되게 하는 유막두께비는 반경비가 증가할수록 감소하며, 부하능력에 관한 최적의 패드형상에 대해서는 최적의 유막두께비가 2.1~2.3정도이다.

(4) 단위부하능력이 최대가 되는 피봇 위치는 패드의 형상에 따라 매우 민감하게 변한다. 또 부하능력을 최적으로 하는 패드형상에 대해서는 최적의 피봇위치를 $\theta_p=0.60\sim0.62$, $r_p=0.52\sim0.54$ 정도로 하는 것이 좋다.

참고문헌

- 1) Bosma, R., and Moses, R., H., "Design Charts for Optimum Bearing configuration : 2 The Pivoted – Pad Thrust Bearing", ASME, J. of Lub. Tech., Vol. 92, 1970, pp. 573~577.
- 2) Etsion, I., "Design Charts for Arbitrarily Pivoted, Liquid – Lubricated, Flat – Sector – Pad Thrust Bearing", ASME, J. of Lub. Tech., Vol. 100, 1978, pp. 279~286.
- 3) Etsion, I., and Fleming, D. P., "An Accurate Solution of the Gas Lubricated, Flat Sector Pad Thrust Bearing", ASME, J. of Lub. Tech., Vol. 99, 1977, pp. 82~88.
- 4) Singh, A. P., "An Overall Optimum Design of a Sector – Shaped Thrust Bearing With Continuous Circumferential Surface Profiles", WEAR, Vol. 117, 1987, pp. 49~77.
- 5) Pinkus, O., and Sternlicht, B., *Theory of Hydrodynamic Lubrication*, McGraw – Hill, New York, 1961.

