

## 틸팅-패드 추력베어링의 성능 향상에 관한 연구

이경우 · 김종수\* · 제양규\*\*

### A Study on the Improvement of Performance in Tilting-Pad Thrust Bearing

*K. W. Lee, J. S. Kim\*, and Y. K. Jei\*\**

**Key words** : parallel line pivoted pad thrust bearing, load carrying capacity, minimum film thickness, pivot position

#### Abstract

This paper describes a new pivoting technique to improve bearing performance in pivoted pad thrust bearings. This new technique adjusts the pivot line in a line pivoted pad thrust bearing to be parallel to the trailing edge of a sector shaped pad. Bearing performance factors such as load carrying capacity, frictional torque and flow rate are numerically investigated for conventional point-pivoted and line-pivoted pads and for the new parallel-line pivoting technique. It is shown that the load carrying capacity can be maximized with the new technique.

#### 1 서 론

추력베어링은 축방향의 하중을 지지하기 위해 사용되는 기계요소이다. 추력베어링에는 여러 가지 종류가 있으며, 사용하고자 하는 운전조건에 따라 가장 적합한 추력베어링을 선정하여 사용하게 된다. 특히, 선박의 추진축계, 대형 원심펌프, 수직 수력발전기, 터빈 등과 같이 운전조건이 가혹한 경우에는 틸팅 패드 추력베어링을 주로 사용하고 있다.

현재 사용되고 있는 틸팅 패드 추력베어링으로는 방사선 지지식 추력베어링(이하 방사선 지

사단법인 한국선급

\* 한국해양대학교 기계공학부

\*\* (주) 엘트웰 I & C

지방식)과 점 지지식 추력베어링(이하 점 지지방식)이 있으며, 지금까지의 연구결과에 의하면 일반적인 설계조건에서는 점 지지방식이 방사선 지지방식보다 유효성능이 더 뛰어난 것으로 보고되고 있다[1-2]. 미끄럼베어링의 유효성능은 유막의 썩기형상에 의해 크게 지배받게 되며, 틸팅 패드 추력베어링에서는 유막의 썩기형상이 지지위치에 의하여 결정된다. 틸팅 패드 추력베어링의 일반적인 최적의 설계조건은 주어진 틸팅 패드 추력베어링의 제원에서 안정적인 유막을 형성하며 하중지지능력이 최대가 되도록 하는 것이다. 지지위치, 선단압력, 베어링의 형상 등이 틸팅 패드 추력베어링의 유효성능에 미치는 영향에 대한 결과가 많이 보고되어 있다[3-9]. Etsion[8]과 Kim&Kim[9]는 최적설계조건에 대해 지지위치나 운전조건 또는 틸팅 패드 추력베어링의 형상에 의한 것이 아닌 패드의 틸팅 운동에 대한 최적의 조건들을 제시하고 있다. 이들은 연구를 통하여 패드 출구부의 유막두께가 회전원판과 평행하게 될 때 즉, 출구부에서 외반경부의 유막두께와 내반경부의 유막두께가 동일하게 될 때 틸팅 패드 추력베어링의 하중지지능력이 최대가 될 수 있음을 보고하고 있다. 특히, Kim등은 이러한 조건을 패드의 틸팅각을 이용하여 명확하게 제시하고 있다.

본 연구에서는 Etsion과 Kim등이 제시한 조건을 응용하여 새로운 형태의 틸팅 패드 추력베어링을 제안하며, 새로이 제안되는 틸팅 패드 추력베어링을 평행선 지지식 추력베어링(이하 평행선 지지방식)이라고 부르기로 한다. Fig. 1은 기존에 사용되던 점 지지방식, 방사선 지지방식과 새로이 제안되는 평행선 지지방식의 개략적인 형상을 나타낸 것이다. Fig. 1을 보면 평행선 지지방식은 지지선이 패드의 출구부와 평행하게 되도록 해주어서, 패드의 틸팅 운동에 관계없이 패드 출구부의 유막두께가 항상 Etsion과 Kim등이 제시한 조건에 적합하도록 한 것이다.

본 연구에서는 평행선 지지방식의 성능해석을 수행하고, 또한 기존에 사용되던 방사선 지지방식과 점 지지방식에 대해서도 평행선 지지방식과 동일한 조건에서 성능해석을 수행

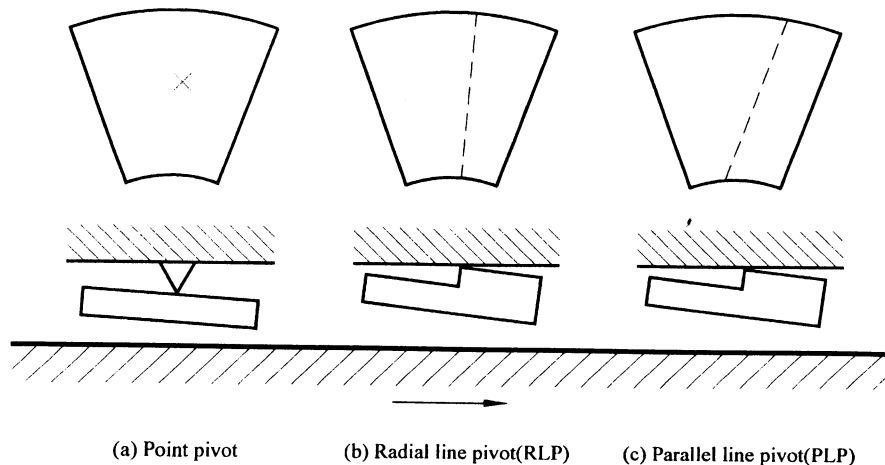


Fig. 1 Schematic diagram of three types of pivoted pad thrust bearing

하여 그 결과들을 비교하여 본 연구에서 새로이 제안된 평행선 지지방식의 우수성을 입증하고자 한다.

### 1. 기본방정식

Fig. 2는 틸팅 패드의 개략적인 형상, 유막의 형상 그리고 패드상의 좌표계를 표시한 것이다. 틸팅 패드 추력베어링의 유막에서 발생하는 압력을 지배하는 레이놀즈 방정식은 식(1)과 같고, 유막두께를 나타내는 식은 각각의 형식에 따라서 식(2), (3)과 같다.

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

점 지지방식의 유막두께:

$$h = h_p + r \sin(\theta_p - \theta) \alpha_p + \{ r_p - r \cos(\theta_p - \theta) \} \alpha_r \quad (2)$$

평행선 지지방식의 유막두께:

$$h = h_p + \{ r \sin(\beta - \theta) - r_m \sin(\beta - \theta_p) \} \alpha \quad (3)$$

방사선 지지방식의 유막두께는 점 지지방식의 유막두께를 구하는 식(2)에서  $\alpha_r$ 이 0으로 된 경우이다. 여기서,  $h_p$ 는 지지위치에서의 유막두께를 나타내며,  $r_m$ 은 평균반경,  $\alpha_p$ ,  $\alpha_r$ 은 각각 피칭 및 롤링각이고,  $\alpha$ 는 평행선 지지방식의 지지선에 대한 틸팅 각이다. 그리고,  $\theta_p$ ,  $r_p$ 는 각각 원주방향과 반경방향의 지지위치 좌표이다. Fig. 1과 Fig. 2를 보면 알 수 있듯이 점 지지방식과 방사선 지지방식의 지지위치와 지지선은 패드 상의 좌표계에 의한 상수로써 표현되지만, 평행선 지지방식의 지지선은 패드 상의 좌표계에 대한 함수의 형태를 가지므로 지지선 상의 한 점을 지지위치로 정의해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 패드의 평균반경과 지지선이 만나는 점을 평행선 지지방식의 지지위치로 정의하였다.

틸팅 패드 추력베어링의 성능인자 중에서 마찰동력손실과 윤활유량을 구하기 위해서는 유막 내에서의 속도분포를 알아야 하는데, 유막내의 속도분포는 식(4), (5)와 같다.

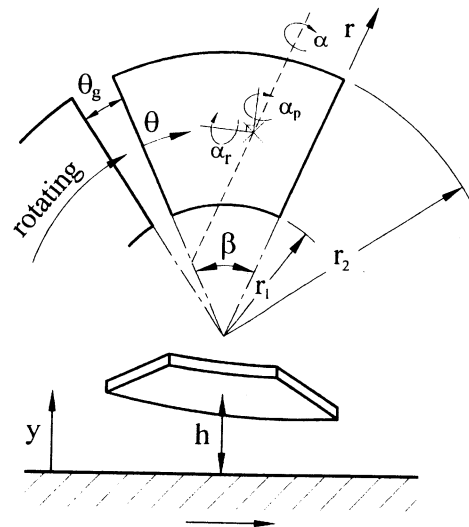


Fig. 2 Geometry and coordinate system of pivoted pads

$$v_{\theta} = (h - y) \left( \frac{r\omega}{h} - \frac{y}{2\mu} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \right) \quad (4)$$

$$v_r = y(y - h) \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

틸팅 패드 추력베어링의 유막에서 발생하는 유막압력의 지배방정식인 레이놀즈 방정식에서 유막압력을 구하기 위해서는 패드의 가장자리에서의 압력경계조건이 필요하며, 본 연구에서는 패드의 가장자리에서의 압력이 대기압이 되도록 다음과 같이 정의하였다.

$$p(r_1, \theta) = p(r_2, \theta) = p(r, 0) = p(r, \beta) = 0 \quad (6)$$

### 3. 성능인자

기본방정식들과 경계조건이 주어지면 레이놀즈 방정식으로부터 유막내에서 발생하는 유막압력을 계산할 수 있으며, 유막압력이 구해지면 틸팅 패드 추력베어링의 하중지지능력을 비롯한 여러 가지 성능인자들을 구할 수 있으며, 이러한 성능인자들을 무차원화 하여 표현하면 식(7)~(11)과 같다.

무차원 부하용량:

$$W = \frac{n_p h_0^2}{\mu \omega r_1^2 A} \int \int p r d\theta dr \quad (7)$$

무차원 마찰동력손실:

$$T_f = \frac{n_p h_0}{\mu \omega r_1^2 A} \int \int \left[ \mu \frac{\partial v_{\theta}}{\partial y} \right]_{y=0} r^2 d\theta dr \quad (8)$$

무차원 윤활유량:

$$Q = \frac{n_p}{h_0 \omega A} \int \int [v_{\theta}]_{\theta=0} dy dr \quad (9)$$

무차원 원주방향 및 반경방향 지지위치:

$$\Theta_p = \frac{\theta_p}{\beta}, \quad R_p = \frac{r_p - r_1}{r_2 - r_1} \quad (10)$$

여기서,  $A = \pi(r_2^2 - r_1^2)$ 이고,  $n_p$ 는 패드의 갯수이다. 윤활유량은 각 패드의 입구에서 공급되는 윤활유량이다.

#### 4. 수치해석

본 연구에서는 패드의 외반경과 내반경의 비( $r_2/r_1$ )가 1.7077이고, 패드 각( $\beta$ )이  $30^\circ$ , 패드의 갯수( $n_p$ )가 10개인 베어링을 선정하였다. 이러한 형상을 가지는 평행선 지지방식에 대해서 광범위한 지지위치에 대한 설계자료를 얻기 위하여 무차원 원주방향 지지위치( $\theta_p$ )를 0.55부터 0.65까지 변화시켜가며 여러 가지 성능인자들을 조사하였다. 그리고, 동일한 제원의 방사선 지지방식과 점 지지방식을 선정하여, 평행선 지지방식과 동일한 무차원 원주방향 지지위치에 대해 성능인자를 조사하였으며, 이 결과를 평행선 지지방식 결과와 비교하였다. 이때, 점 지지방식의 무차원 반경방향 지지위치는 무차원 반경방향 지지위치( $R_p$ )를 0.01단위로 끊었을 때, 무차원 하중지지능력이 최대가 되는 무차원 반경방향 지지위치와 그 주위의 값들을 사용하였으며, 본 연구에서 선정한 제원의 틸팅 패드 추력베어링에서는  $R_p = 0.52$ 일때가 무차원 하중지지능력이 최대가 되므로, 여기서는  $R_p = 0.51, 0.52, 0.53$ 을 사용하였다. 수치해석은 유한차분법으로 수행하였으며 이를 위하여 패드를 반경방향과 원주방향으로 각각 20등분하였다.

주어진 지지위치에 대한 수렴조건은 형식에 따라 각각 식(13), (14)와 같이 하였으며, 주어진 지지위치를 만족하는 틸팅 각을 구하는 데는 뉴턴-랩슨법을 사용하였다.

점 지지방식:

$$\sqrt{(R_p - R_p^c)^2 + (\theta_p - \theta_p^c)^2} < 10^{-5} \quad (11)$$

방사선 지지방식, 평행선 지지방식:

$$\sqrt{(\theta_p - \theta_p^c)^2} < 10^{-5} \quad (12)$$

여기서, 상첨자 c는 계산된 지지위치를 말한다. 그리고 계산된 지지위치는 유막압력에 의해서 발생하는 모멘트의 합이 0이 되는 곳으로 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$r_p^c = \frac{\sqrt{\left(\int p r^2 \sin \theta d\theta dr\right)^2 + \left(\int p r^2 \cos \theta d\theta dr\right)^2}}{\int p r d\theta dr}$$

점 지지방식 및 방사선 지지방식;

$$\theta_p^c = \tan^{-1} \left( \frac{\int p r^2 \sin \theta d\theta dr}{\int p r^2 \cos \theta d\theta dr} \right)$$

평행라인 형식;

$$\theta_p^c = \beta - \sin^{-1} \left( \frac{\int p r^2 \sin(\beta - \theta) d\theta dr}{r_p \int p r d\theta dr} \right)$$

### 5. 결과 및 고찰

본 연구에서 선정된 제원을 가지는 방사선 지지방식, 점 지지방식 그리고 평행선 지지방식에 대하여 성능해석을 수행하여 여러 가지 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 3은 무차원 원주방향 지지 위치의 변화에 따른 무차원 하중지지능력을 나타낸 것으로서, 모든 지지위치에 대하여 방사선 지지방식과 포인형식에 비해 평행선 지지방식의 무차원 하중지지능력이 항상 최대인 것을 알 수 있다. 이로써 패드 출구부의 유막두께를 회전원판과 평행하게 해주어서 하중지지능력이 최대가 되도록 고안된 평행선 지지방식의 하중지지능력이 모든 지지위치에서 방사선 지지방식과 점 지지방식에 비해 항상 최대가 된다는 것을 증명할 수 있었다. 각 형식의 톨팅 패드 추력베어링에서 무차원 하중지지능력이 최대가 되는 지지위치는 평행선 지지방식의 경우에는  $\theta_p = 0.60$ , 점 지지방식의 경우에는  $R_p = 0.52$ ,  $\theta_p = 0.59$  그리고 방사선 지지방식의 경우에는  $\theta_p = 0.58$ 로 나타났으며, 평행선 지지방식의 무차원 하중지지능력이 최대가 되는  $\theta_p = 0.60$ 일 때의 무차원 하중지지능력과 방사선 지지방식의 무차원 하중지지능력이 최대가 되는  $\theta_p = 0.58$ 일 때의 무차원 하중지지능력을 비교하여 보면 평행선 지지방식의 하중지지능력이 약 23%가량 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 패드의 형상 및 크기에 따라 달라질 것이다.

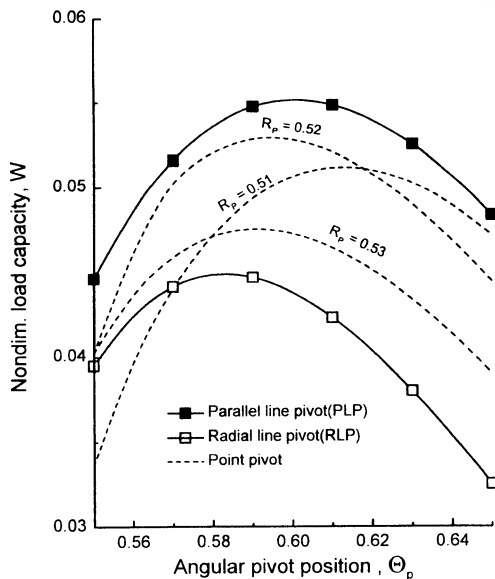


Fig. 3 Comparison of nondimensional load carrying capacity

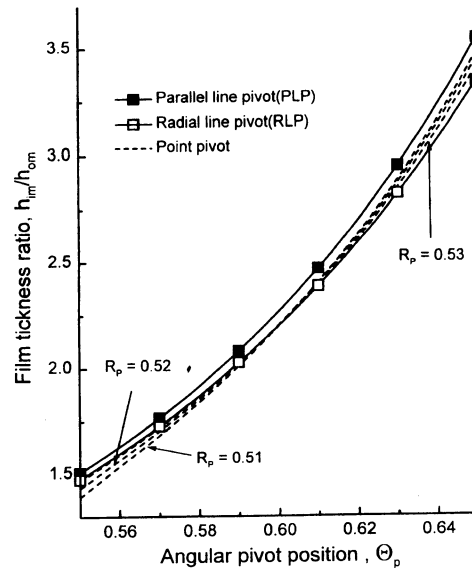


Fig. 4 Comparison of film thickness ratio in the circumferential direction

Fig. 4는 패드의 입구부와 출구부의 평균반경에서의 유막두께 비를 나타낸 것이다. 패드의 형상에 따라 다르지만, 일반적으로 패드의 입구부와 출구부의 평균반경에서의 유막두께 비가 2.0 근방일 때 틸팅패드 추력베어링의 하중지지능력이 최대가 되는 것으로 알려져있다. 본 연구에서도 세가지 형식의 틸팅패드 추력베어링 모두가 입구부와 출구부의 평균반경에서의 유막두께 비가 약 1.8~2.3일 때 무차원 하중지지능력이 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 패드의 출구부에서 외반경부와 내반경부의 유막두께 비를 나타낸 것이다. 앞서 말한 바와 같이, 평행선 지지방식은 패드 출구부의 유막두께가 회전원판과 평행하게 되도록 고안된 것이므로 출구부에서 외반경과 내반경의 유막두께가 동일하게 된다. 그러므로, 모든 무차원 원주방향 지지위치에서 외반경부와 내반경부의 유막두께비가 1.0이 된다. 점 지지방식의 경우에는 반경방향 지지위치가 외반경부로 이동할수록 내반경부의 유막두께에 비해 외반경부의 유막두께가 점점 더 작아지는 경향이 있는데, 이것은 반경방향 지지위치가 외반경부로 이동할수록 패드가 힘의 평형을 유지하기 위하여 외반경부에서 더 많은 압력을 발생시키기 위해 외반경부에 최소유막을 발생시키기 때문이다.

Fig. 6는 무차원 원주방향 지지위치의 변화에 따른 무차원 마찰동력손실의 변화를, Fig. 7은 무차원 윤활유량의 변화를 나타낸 것으로서 원주방향 지지위치의 변화에 따른 경향이 반대로 나타나고 있다. 원주방향 지지위치가 출구부쪽으로 이동할수록 무차원 마찰동력손실은 감소하고, 무차원 윤활유량은 증가하고 있다. 이것 또한 유막형상의 변화에 의해 나타나는 현상으로써, 무차원 마찰동력손실은 유막두께에 반비례하고, 무차원 윤활유량은 입구부에서 새로이 공급되는 윤활유량을 정의한 것이므로 입구부의 유막두께에 비례하게 된다. Fig. 4를 보면 무차원

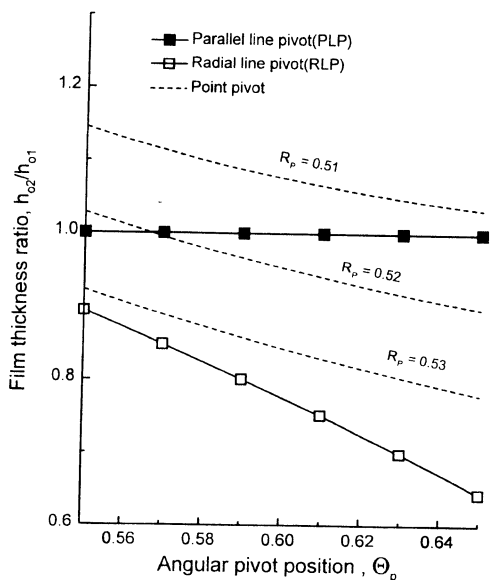


Fig. 5 Comparison of film thickness ratio in the radial direction

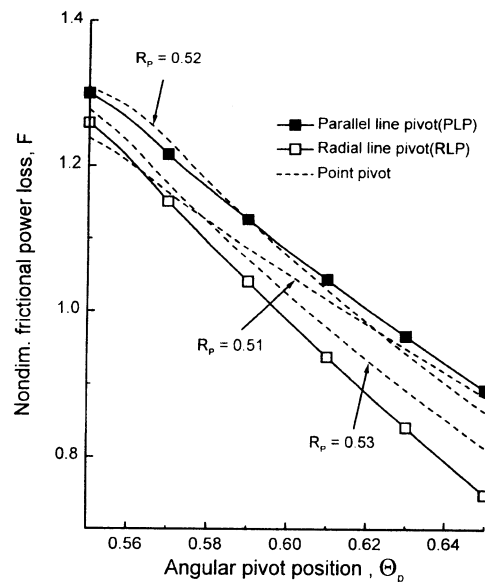


Fig. 6 Nondimensional frictional power loss



원주방향 지지위치가 출구부쪽으로 이동할수록 입구부와 출구부의 유막두께 비가 점점 더 커져서 전체적인 유막두께와 입구부에서의 유막두께가 커지기 때문이다.

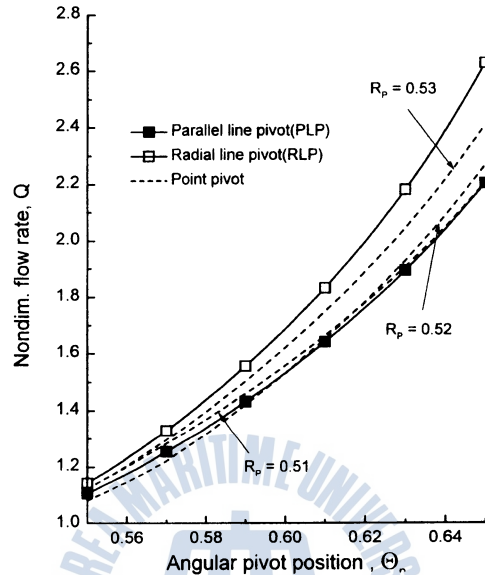


Fig. 7 Comparison of nondimensional flow rate

## 6. 결 론

본 연구에서는 새로이 제안된 평행선 지지방식의 우수성을 입증하기 위하여 광범위한 지지위치에 대하여 성능해석을 수행하였고, 기존의 방사선 지지방식과 점 지지방식에 대하여도 동일한 지지위치에 대하여 성능해석을 수행하였으며, 각각의 결과들을 비교 검토하였다.

세 가지 형식의 틸팅 패드 추력베어링 중에서 평행선 지지방식의 무차원 하중지지능력이 모든 지지위치에서 항상 최대가 된다는 것을 알 수 있었으며, 기존의 방사선 지지방식에 비해서는 무차원 하중지지능력이 최대가 되는 지지위치를 기준으로 약 23%정도의 성능향상이 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 결과로써 평행선 지지방식의 추력베어링이 최적의 틸팅 패드 추력베어링이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Gardner, W. W., "Tilting Pad Thrust Bearing Tests - influence of Pivot Location", Trans. ASME J. of Tribology, Vol.110, pp.609-613, 1988
2. 이경우, 김종수, "피벗식 추력베어링의 성능비교", 한국박용기관학회 97년도 추계학술대회 초록집, pp22-27, 1997
3. 김종수, "틸팅 패드 추력베어링의 동특성 해석", 한국윤활학회지, 제13권, 제3호, pp.27-38, 1997
4. 이경우, 김종수, "선단압력이 틸팅패드 추력베어링의 운전특성에 미치는 영향", 한국박용기관학회 97년도 춘계학술대회 초록집, pp36-41, 1997



5. Rodkiewicz, C. M., Kim, K. W. and Kennedy, J. S., "On the Signification of the Inlet Pressure Build-up in the Design of Tilting-Pad Bearings", Trans. ASME, J. of Tribology, Vol.112, pp.17-22, 1990
6. Hashimoto, H., "Performance Characteristics Analysis of Sector-Shaped Pad Thrust Bearings in Turbulent Inertia Flow Regime Under Three types of Lubrication Conditions", Trans. ASME J. of Tribology, Vol.112, pp.477-485, 1990
7. Hashimoto H., Wada S., Yoshida T., "Pressure Boundary Conditions of High-Speed Thrust Bearings", JSME Int. journal, SeriesIII, Vol.32, No.2, 1989
8. Etsion, I., "Design Charts for Arbitrarily Pivoted, Liquid-Lubricated, Flat-Sector-Pad Thrust Bearing", Trans. ASME J. of Lub. Tech. Vol.100, pp.279-286, 1978
9. 김종수, 김경웅, "부채꼴형 추력베어링의 설계에 있어서 선단압력의 영향", 한국윤활학회지, 제10권, 제4호, pp.33-42, 1994



