

## 패드 선단압력 발생을 고려한 틸딩-패드 저어널 베어링의 성능에 관한 실험적 연구

김승철\* · 김경웅\*\*

\* 현대자동차 마복리 연구소

\*\* 한국과학기술원 생산공학과

## An Experimental Study on the Performance of Tilting-Pad Journal Bearing in Consideration of Ram-Pressure

Seung-Cheol Kim & Kyung-Woong Kim\*\*

\* Hyundai Motors Company

\*\* Dept. of Production Engineering, KAIST

**Abstract** - The influences of ram pressure on the performances of tilting-pad journal bearings are investigated experimentally. The test rig consists of a single tilting-pad and a rotating journal. Film thicknesses and pressure distribution of the lubricating film are measured continuously for several values of coordinate of the pivot position and journal speed.

The findings of the investigation are as follows:

- (1) According as the journal speed increases the ram pressure increases, maximum pressure decreases and the pivot position which maximize the minimum film thickness shifts toward the leading edge.
- (2) The ram pressure makes it possible to generate the converging wedge and the positive pressure between the pad and the journal even when the pad is supported at the points between the leading edge and the center of the pad.
- (3) The influence of the ram pressure on the performance of tilting pad bearings is significant and must be considered in the design of these bearings.

## 1. 서 론

안정성과 진동억제특성이 요구되는 터어빈이나 모터 등의 고속 회전 기계에서는 틸딩-패드 저어널 베어링이 많이 사용되고 있다. 이는 틸딩 패드 저어널 베어링에서는 패드가 피벗이나 로울러로 지지되어 있으므로 윤활유막에서 발생하는 압력의 합력중심이 항상 이 지지점을 지나게 되어 베어링의 안전특성이 향상되기 때문이다.

틸딩-패드 저어널 베어링은 추력 베어링과 같이 불연속적인 윤활면을 갖는다. 그러므로 베어링의 입구부 선단에서 공급되는 윤활유의 충돌로인한 압력격변이 일어난다. 이때 패드 입구부에서 발생하는 압력을 선단압력이라 한다. 이러한 선단압력으로 인한 베어링의 성능 변화에 관한 연구는 주로 추력 베어링에 대하여 이론 및 실험적으로 수행되어져 왔으며 그 결과들은 선단압력이 베어링의 성능에 미치는 영향을 무시할 수 없음을 보여주고 있다.(1-4) 그러나 아직도 선단압력의 영향이 제대로 파악되고있지 못하며, 특히 틸딩-패드 저어널 베어링에서 선단압력의 영향을 조사한 연구는 많이 부족한

실성이다.(5-7)

그러므로 본 연구에서는 유한폭 틸딩-패드 저어널 베어링을 모델화한 실험장치를 설계, 제작하여 선단압력을 포함한 유막내의 압력분포 및 유막두께를 연속적으로 측정함으로써 틸딩-패드 저어널 베어링의 성능에 미치는 선단압력의 영향을 실험적으로 조사하기로 한다.

## 2 실험

### 2-1. 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용한 실험장치의 개략도이다. 직경 196mm, 폭 104mm의 저어널은 수평으로 지지되어 있고 그 위에 하중지지점에서 롤링(Rolling), 피칭(Pitching) 요잉(Yawing) 운동을 할 수 있는 패드를 설치하여 모델화한 틸딩-패드 저어널 베어링을 구성하도록 되어 있다. 저어널의 재질은 SUS 304, 패드는 황동으로 제작하고, 패드의 원주각은 36도, 패드의 폭은 62mm이며 패드 윤활면의 반경은 98.15mm이다. 패드 하중지지점의 위치는 추방향으로는 중앙선상에 있으며, 원주방향으로

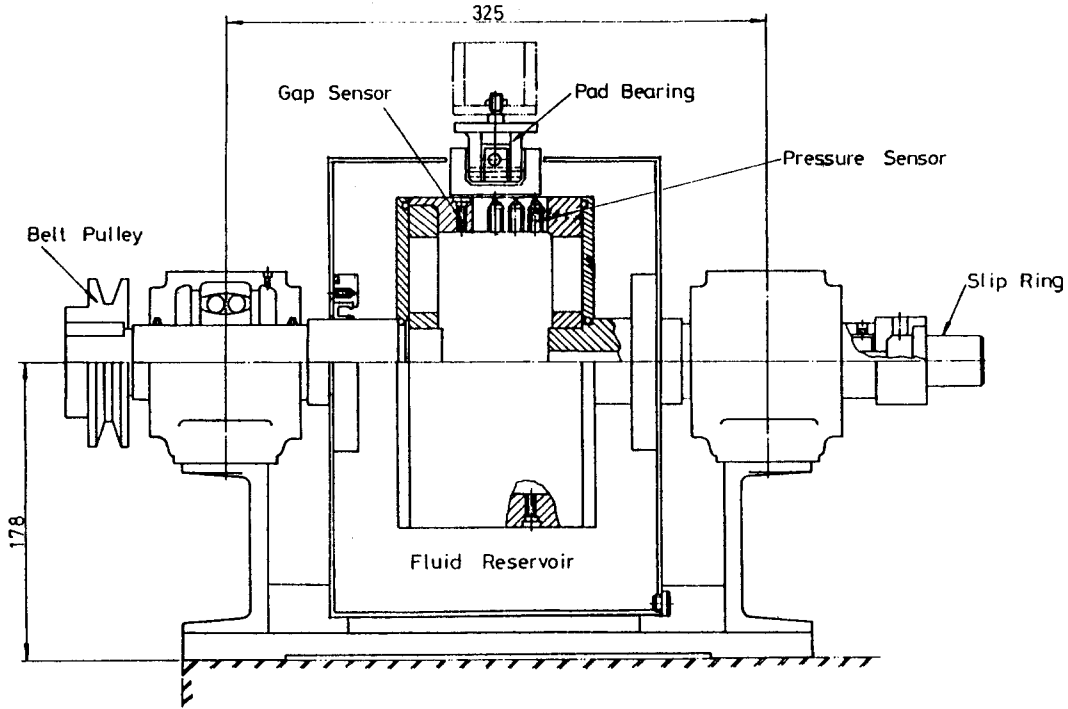


Fig.1. Front view of test apparatus

는 선단에서 40-60%의 곳에 임의로 위치할 수 있도록 되어 있다. 하중은 추를 사용하여 정하중으로 가해진다

2 - 2 실험 내용

회전하는 제어널에 부착된 압력계와 간극변환기로 유막내의 연속적인 압력분포 및 유막두께를 원주방향으로 측정하였다.

압력은 패드의 폭 방향이 서로 대칭이므로 3곳( $I_p = 0, 1, 0.3, 0.5$ )에서 측정하여 선단압력과 최고압력 위치를 관찰하였고, 유막두께는 축길이 방향으로 2곳에 설치된 간극변환기를 사용하여 측정함으로써 패드의 기울기와 최소 및 최대 유막두께를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig 2는 베어링내의 유막 두께를 측정한 출력신호와 패드와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 A, B, C, D, 는 각각 그림 (b)의 a, b, c, d에 대응된다. 따라서 그림 (a)의 A와 B사이, C와 D사이의 길이는 간극변환기의 직경과 같다. 그러므로 A와 B사이의 가운데에서 C와 D사이의 가운데까지의 거리가 실제 패드의 원주방향 길이이다.

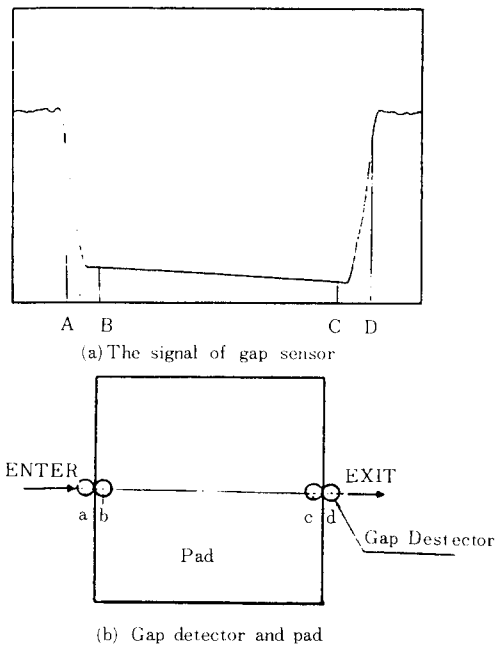


Fig.2. An example of gap signal

Fig 3에서 (a), (b)는 패드의 선단에서 원주방향으로 40%, 폭방향으로 50%, 인 곳에서 하중을 가하며 측정된 유막내의 연속적인 압력분포와 유막두께를 보여준

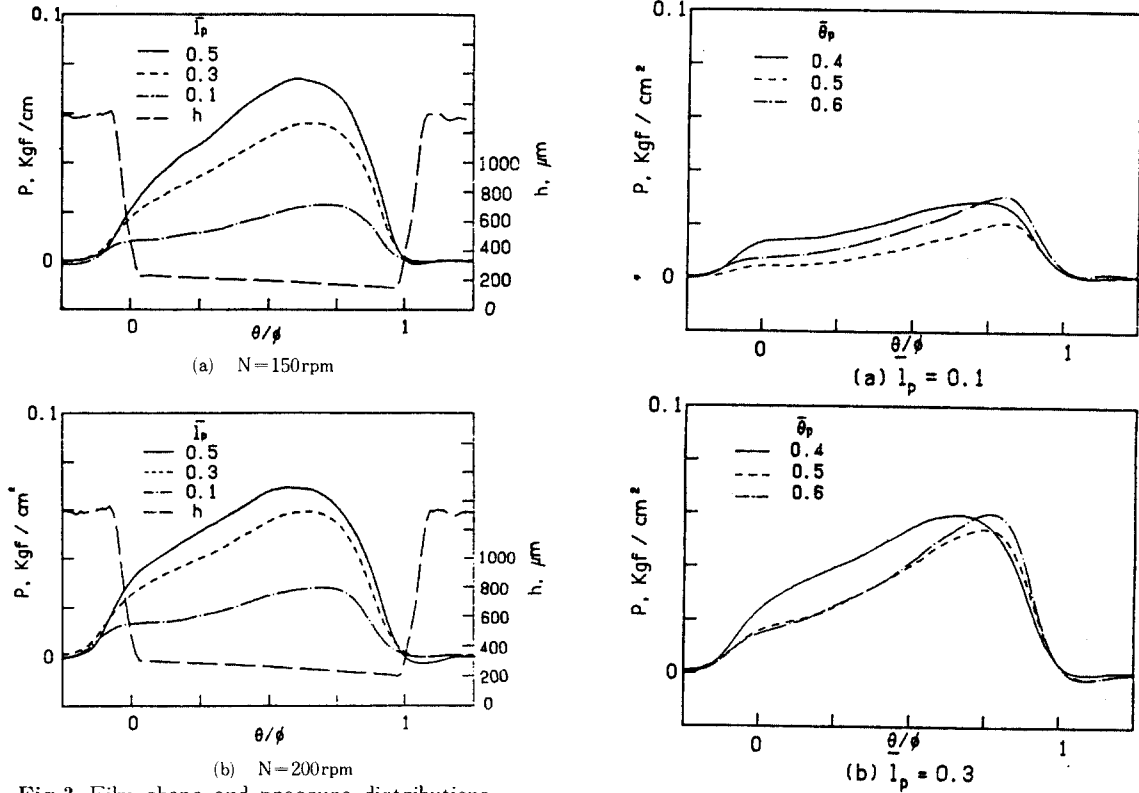


Fig.3. Film shape and pressure distributions  
 $p_m=0.025\text{kgf/cm}^2$

다. 두 그림에서와 같이 패드 원주방향으로 선단과 중심사이에서 하중을 가하여도 췌기형의 유막이 형성되며, 유막내부에 압력이 발생한다. 이는 패드의 선단부에 압력이 발생하여서 패드 선단이 들리어지게 하여 유막형상비를 증가시키기 때문이다.

Fig. 4는 동일한 속도와 하중 상태에서 하중지지점이 변함에 따른 유막내의 압력분포와 유막두께를 보여준다. 그림에서 (a), (b), (c)는 각각 패드 폭방향으로 한쪽에서 10%, 30%, 50%의 곳에서 측정된 압력분포를 하중지지 위치에 따라 비교한 것이다. 그림에서 하중지지점이 패드의 선단쪽으로 이동할수록 선단압력이 증가하며 최고압력위치는 선단부쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 하중지지점이 선단부쪽으로 이동할수록 유막형상비가 감소되나,  $\bar{\theta}_p=0.6$ 와  $\bar{\theta}_p=0.5$ 인 경우의 유막형상비의 차이에 비하여  $\bar{\theta}_p=0.5$ 와  $\bar{\theta}_p=0.4$ 인 경우의 유막형상비의 차이는 그다지 크지 않다. 이것은  $\bar{\theta}_p=0.6$ 와  $\bar{\theta}_p=0.5$ 인 경우의 선단압력의 차이는 별로 크지 않은 것에비하여  $\bar{\theta}_p=0.5$ 와  $\bar{\theta}_p=0.4$ 인 경우의 선단압력의 차이가 크게 되므로 하중지지점이 선단쪽으로 이동함에 따른 유막형상비의 감소가 억제되기

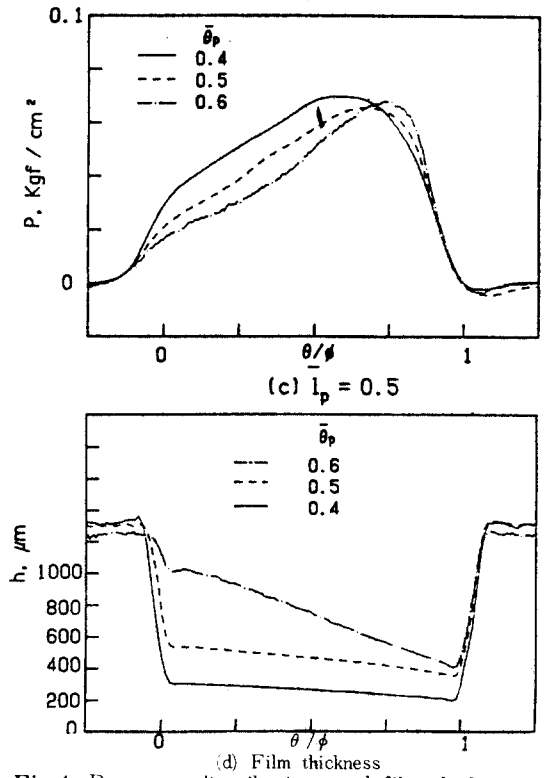


Fig.4. Pressure distributions and film thickness  
 $p_m=0.025\text{kgf/cm}^2$ ,  $N=200\text{rpm}$

때문이라고 해석할 수 있다.

Fig. 5는 동일한 하중을 각각 다른 위치에서 지지할 때 속도가 변함에 따른 패드 길이방향의 압력분포를 보여준다. (a), (b), (c) 각 그림에서 저어널의 회전속도가 증가하면 선단압력은 커지고 최고압력은 작아진다. 이는 일정한 하중하에서 저어널의 회전속도가 증가하면 패드 선단에 공급되는 유체의 속도가 커짐으로 선단압력이 증가하기 때문에 압력의 적분값이 일정치를 유지하도록 최고압력이 작아지는 것으로 추정된다.

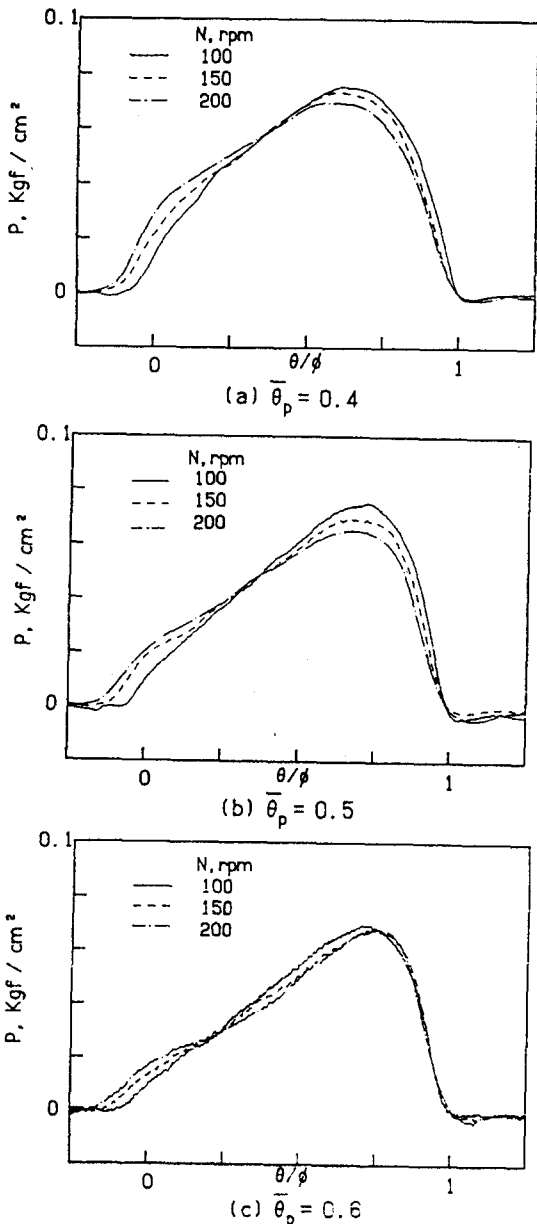


Fig.5. Pressure distributions  $\bar{I}_P=0.5, p_m=0.025\text{kgf/cm}^2$

Fig.6의 각 그림은 동일한 하중과 지지위치에서의 패드 폭방향의 선단압력을 나타낸다. 그림에서와 같이 선단압력은 패드 중심부 쪽일수록 커지며 또한 저어널의 회전속도가 증가하면 커진다. 패드 중심부로 갈수록 선단에서의 압력구배가 커져 윤활유의 유막 입구속도가 작아진다. 따라서 공급유의 속도차가 커지게 되어 선단압력은 증가한다.

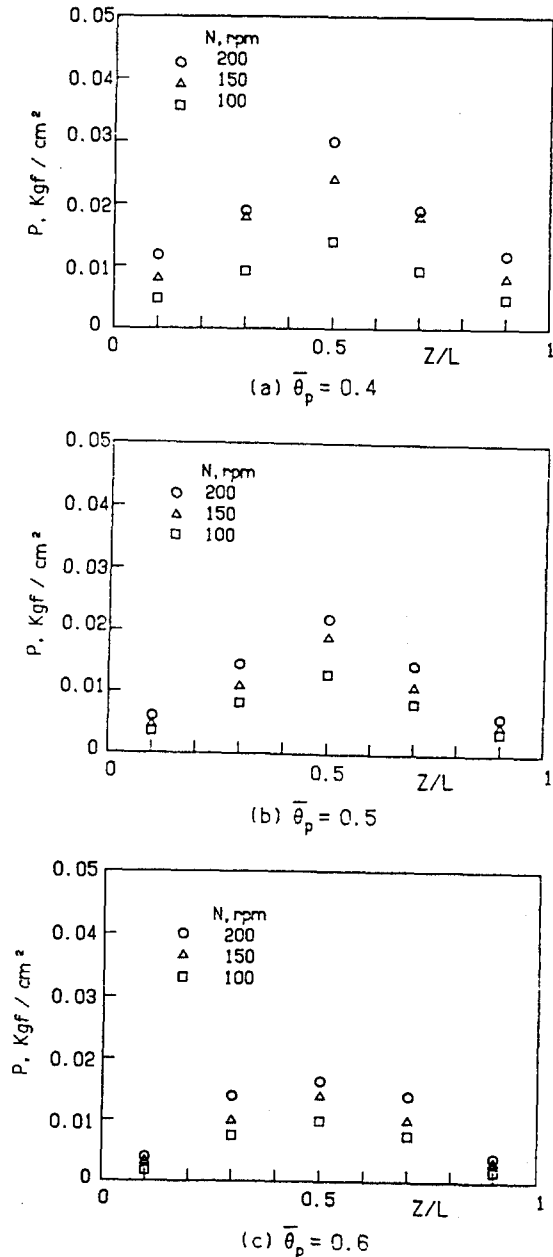


Fig.6. Ram-Pressure distributions

Fig. 7은 윤활유의 점성계수는 동일하고 N/Pm이 일정한 값이 되는 2가지 경우에 대하여 하중지지위치 변화에 따른 최소유막두께의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 회전속도가 증가하면 최소유막두께를 최대한 하는 하중지지 위치는 패드 선단쪽으로 이동한다. 이는 선단압력이 발생하지 않을 때에는 최소유막두께를 최대한 하는 하중지지 위치는 운전조건과 관계없이 일정하나 선단압력이 발생하면 최소유막두께를 최대한 하는 하중지지 위치는 선단압력이 발생하지 않는 경우에 비하여 패드 선단쪽으로 이동되며, 회전속도가 증가할수록 그 효과가 커지기 때문이다(4). 따라서 저어널의 회전속도가 증가할수록 하중지지 위치는 선단쪽으로 이동하여야 베어링의 성능이 향상됨을 알 수 있다.

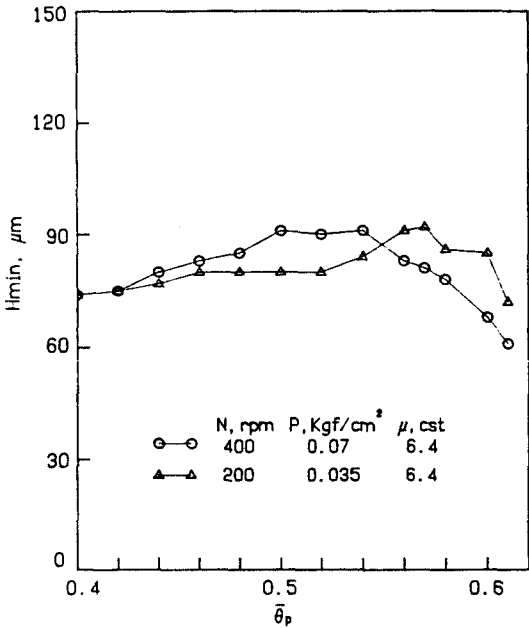


Fig. 7. Minimum film thickness vs. pivot position

Fig. 8은 윤활유의 점도를 달리하여 하중지지 위치에 따른 최소유막두께의 크기를 나타낸다. 그림에서 최소유막두께를 최대한 하는 하중지지 위치는 점성계수가 큰 윤활유보다는 점성계수가 작은 윤활유를 사용한 경우가 보다 선단쪽에 있으며, 이는 점성계수가 작을수록 선단압력 발생이 최소유막두께를 최대한 하는 최적 하중지지 위치에 미치는 영향이 더 클을 의미한다.

Fig. 9는 하중지지 위치에 따른 유막형상비를 나타낸다. 그림에서와 같이 동일한 속도하에서는 하중지지 위치가 패드 후미부로 이동함에 따라 유막형상비가 증가한다. 그리고 저어널의 회전속도가 증가하면 유막형상비도 증가

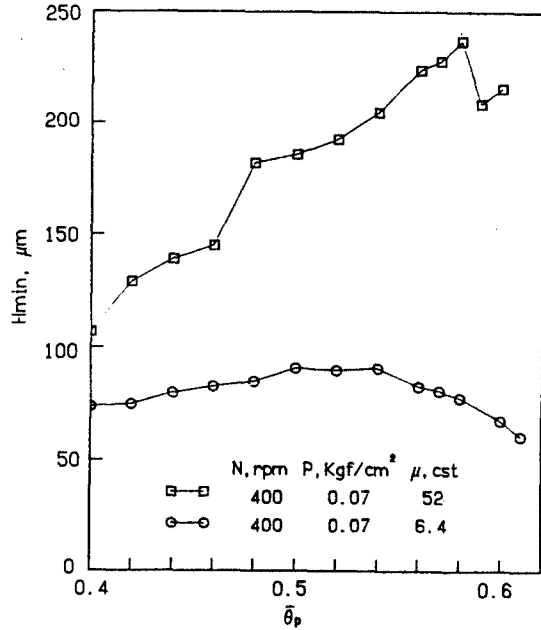


Fig. 8. Minimum film thickness vs. pivot position

한다. 이는 저어널의 회전속도가 증가하면 선단압력이 커지면서 패드의 선단부가 더 들어오게 하기 때문이다. 일반적으로 최대 부하능력을 지지하는 유막형상비는 2-3정도이며, 따라서 Fig. 7에서 고찰한 바와같이 저어널의 회전속도가 증가하면 하중지지 위치를 선단쪽으로

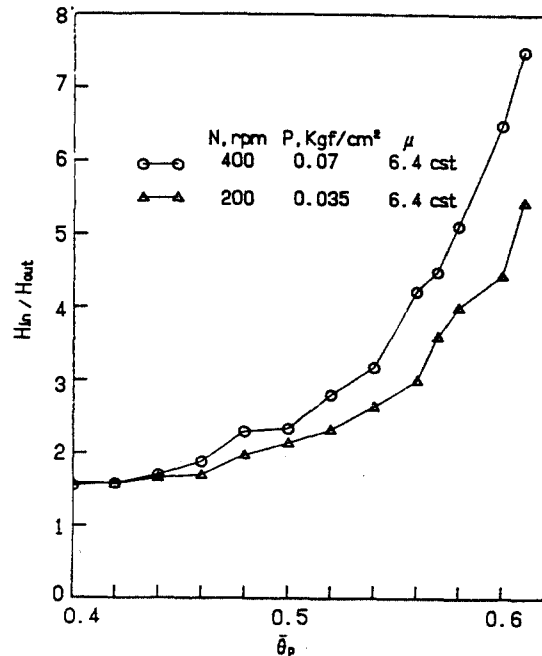


Fig. 9. Circumferential film ratio vs. pivot position

로 이동시켜야 적합한 유막형상비가 되어 부하능력을 증가시킬 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 유한폭 틸팅-패드 저어널 베어링에서 저어널의 회전속도, 하중 및 하중지지위치의 변화에 따른 유막압력 및 유막두께의 연속적인 분포를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선단압력의 영향으로 패드 선단과 중심부 사이에서 하중을 가하여도 쉘기형의 유막이 형성되며, 그로 인하여 유막압력이 발생한다.
2. 하중이 일정한 조건에서 저어널의 회전속도가 증가하면 유막내부의 최고압력은 감소하고 선단압력은 증가한다.
3. 저어널의 회전속도가 증가함에 따라 최소 유막두께를 최대로 하는 하중지지위치는 선단쪽으로 이동한다.
4. 하중지지위치가 패드 중심에서 후부부쪽으로 이동함에 따라 유막형상비는 증가하며, 저어널의 회전속도가 증가하면 유막형상비도 증가한다.

위에서와 같이 틸팅-패드 저어널 베어링에서 패드의 선단압력이 베어링 성능에 미치는 영향이 매우 중요하며, 이러한 베어링을 설계할 때 이를 충분히 고려하여야 한다.

## 5. 기호설명

- h : 유막두께  
 hin : 패드 입구부의 유막두께  
 hout : 패드 출구부의 유막두께  
 유막형상비 = hout/hin  
 L : 패드 길이  
 lp : 패드 폭방향의 한쪽에서 압력측정 위치까지의 거리  
 $\bar{l}_p = l_p/L$   
 N : 저어널의 회전속도  
 P : 유막압력  
 Pm : 패드에 작용하는 평균면압  
 $\theta$  : 패드 길이 방향의 압력 및 유막두께 측정 위치까지의 원주 각도  
 $\theta_p$  : 패드 길이 방향의 하중지지점의 좌표값

$$\bar{\theta}_p = \frac{\theta_p}{\phi}$$

- $\phi$  : 패드의 원주각  
 $\mu$  : 윤활유의 점도  
 z : 패드 폭방향의 좌표값

## 참 고 문 헌

1. N. Tipei, "Flow Characteristics and Pressure Head Build-Up at the Inlet of Narrow Passages," Trans. ASME, Series F, J. of Lub. Tech., Vol. 100, 1978, pp. 47-55
2. Mori, A., Iwamoto, M. and Mori, H., "Performance Analysis of a Plane Inclined Slider Pad Relative to Fluid Inertia Forces (2nd Report)," JSLE, Vol. 28, No. 9, pp. 677-684, 1983.
3. 박홍규, 김경웅, "피봇식 추력 베어링의 선단압력과 THD 성능에 관한 실험적 연구," J. of KSLE, Vol. 2, No. 1, 1986.
4. 김종수, 김경웅, "패드의 선단압력을 고려한 부채꼴 모양의 피봇식 추력 베어링의 성능해석," 대한기계학회 논문집, 제12권, 제 5호, pp. 1063 - 1070, 1988.
5. 김종수, 김경웅, "선단압력을 고려한 틸팅-패드 저어널 베어링의 정특성 및 동특성 해석," 한국윤활학회 조록집, 제 8 회, pp. 57 - 66, 1988.
6. A. Mori and H. Mori, "Inlet Boundary Condition for Submerged Multi-PAD Bearings Relative to Fluid Inertia Forces," the 13th Leeds-Lyon Sympo. on Tribology.
7. Yonchul Rhim and John A. Tichy, "Entry Flow of Lubricant into a Slider Bearing-Analysis and Experiment," STLE. Tribology Trans. Vol. 31, 3, 1987, pp. 350-358.