

# 범프포일의 3차원 형상을 고려한 공기 포일저널베어링의 정특성 해석

이동현<sup>†</sup> · 김영철\* · 김경웅<sup>‡</sup>

한국과학기술원 기계공학과, \*한국기계연구원 회전체연구그룹

## The Static Performance Analyses of Air Foil Journal Bearings Considering Three-Dimensional Structure of Bump Foil

Donghyun Lee<sup>†</sup>, Youngchul Kim\* and Kyungwoong Kim<sup>‡</sup>

Department of Mechanical Engineering, KAIST

\*Rotordynamics Group, KIMM

**Abstract** – The calculation of bump foil deflection is very important to predict the performance of foil bearings more accurately, because the foil bearings consist of top foil and its elastic foundation usually called bump foil. For the purpose of this, a finite element model considering 3-dimensional structure of the bump foil is developed to calculate the deflection of inter-connected bump. The results obtained from the suggested model are compared and analyzed with those from the previous proposed deflection models. In addition, load capacity of the foil bearings is analyzed by using this model.

**Key words** – foil journal bearing, connected bump, load carrying capacity.

### 1. 서 론

포일베어링의 윤활면은 톱포일과 톱포일을 지지하는 범프포일로 구성되며 공기막에서 발생된 압력에 의해 윤활면이 변형을 하는 특징을 가진다. 따라서 포일베어링의 성능을 해석할 때 공기막에서 발생된 압력에 의한 범프포일의 변형 예측은 무엇보다 중요하다. 범프포일의 변형 계산을 위하여 Walowit[1]과 Heshmat[2]은 변형계산 방법을 처음으로 제시하였다. 이 변형 계산법에서 범프포일은 가해진 압력에 비례하여 변형을 하며 모든 점이 서로 독립적으로 변형을 한다. 따라서 이 변형계산 방법은 축방향 양끝단의 변형은 무시되며, 이 때문에 이 변형 계산법을 사용하면 편심율이 1이 넘는 영역에서의 성능해석은 불가능하다. 이후 Peng[3]은 범프포일의 변형이 축방향으로 모두 균일하다는 가정으로

축방향 평균압력을 이용하여

범프포일의 변형을 계산하는 방법을 제시하였다. 이 변형 계산법은 편심율이 1이 넘는 영역에서의 성능해석은 가능하나, 축방향 평균압력으로 범프포일의 변형을 계산함으로써 공기막에서 발생된 압력이 축방향으로 모두 균일하게 취급되는 단점을 가지고 있다.

그러나 Fig. 1과 같은 범프포일의 형상을 고려할 때 범프포일의 변형은 모든점이 서로 독립적이지 않고 공기막에서 발생되는 압력 또한 축 방향으로 균일하지 않다. 그러므로 Heshmat[2]과 Peng[3]이 제시한 범프포일 변형 계산법은 실제와 다소 차이가 있을 수 있고 이로 인하여 성능 해석결과 또한 실제와 다를 수가 있다.

따라서 본 논문에서는 보다 정확한 포일베어링의 성능해석을 위하여 범프포일의 3차원 형상을 고려한 변형 계산법을 제시 하였고, 이를 통하여 정특성 해석을 수행하여 기존 범프포일 변형 계산법을 사용하여 계산한 결과와 비교 하였다.

<sup>†</sup>주저자 : dhyun@kaist.ac.kr

<sup>‡</sup>책임저자 : taeho@kaist.ac.kr

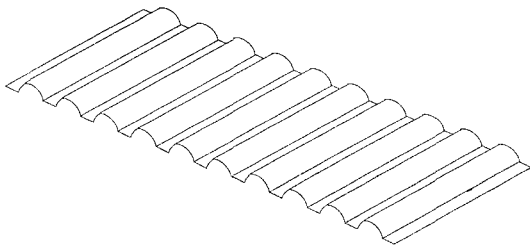


Fig. 1. Schematic diagram of bump foil

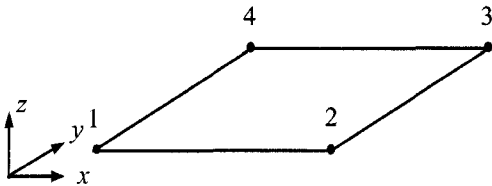


Fig. 2. Rectangular 4 nodes element.

## 2. 범프포일 변형계산

### 2-1. 해석대상

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 범프포일을 해석대상으로 하였다. 여기서 모든 범프는 서로 연결이 되어있으며 이로 인한 범프 상호간의 간섭 또한 모두 고려하게 된다.

### 2-2. 범프포일 변형계산 방법

범프포일의 변형계산은 유한요소법을 사용하여 수행하였다. Fig. 2와 같은 사각형 평판요소의 측면 방향(z 방향)으로 작용하는 힘에 의한 변위는 식(1)과 같은 Kirchhoff 평판 방정식을 통해 계산

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q \quad (1)$$

할 수 있다.

식(1)을 이용하여 식(2)와 같이 변위와 관련된 강성행렬, 하중벡터를 구할 수가 있으며 이는 각각 식(3), 식(4)의 형태로 나타내어진다.

$$[\tilde{K}] \{ \tilde{d} \} = \{ \tilde{f} \} \quad (2)$$

$$\tilde{K}_{ji} = \int_{\Omega} \left[ D \left( \frac{\partial^2 \tilde{N}_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \tilde{N}_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{N}_i}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \tilde{N}_j}{\partial y^2} \right) + 2D(1-\nu) \frac{\partial^2 \tilde{N}_i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \tilde{N}_j}{\partial x \partial y} + D\nu \left( \frac{\partial^2 \tilde{N}_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \tilde{N}_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{N}_i}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \tilde{N}_j}{\partial x^2} \right) \right] d\Omega, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (3)$$

$$\tilde{f}_j = \int_{\Omega} q \tilde{N}_j d\Omega, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (4)$$

이때의 변위벡터는 각각의 점에서의 z방향 변위와 x, y방향 곡률로서 식(5)와 같이 표현된다.

$$\{ \tilde{d} \} = \{ w_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \dots, w_4, \theta_{x4}, \theta_{y4} \}^T \quad (5)$$

또한 사각형 요소의 x, y방향 힘에 의한 변위 u, v 와 응력은 z 방향 응력 성분이 없는 평면응력(plane stress) 상태에 있다고 가정하여 식(6)과 같은 형태의 강성행렬과 하중벡터로 나타낼 수 있다.

$$[\bar{K}] \{ \bar{d} \} = \{ \bar{f} \} \quad (6)$$

$$[\bar{K}] = \int_{\Omega} [B]^T [C] [B] d\Omega \quad (7)$$

이때 응력과 변형율 사이의 관계를 나타 내는 [C]는 식(8) 과 같이 나타내어지고 변형율과 변위 사이의 관계를 나타내는 [B]는 형상함수와 각 노드점에서의 변위를 통하여 식 (9)의 형태로 나타내어진다.

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{Et_b}{(1-\nu^2)} & \frac{\nu Et_b}{(1-\nu^2)} & 0 \\ \frac{\nu Et_b}{(1-\nu^2)} & \frac{Et_b}{(1-\nu^2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Et_b}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\{ \varepsilon \} = [B] \{ \bar{d} \} = [L] [N] \{ \bar{d} \} \quad (9)$$

이때 [L], [N], {d}는 각각 다음과 같다.

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} \bar{N}_1 & 0 & \bar{N}_2 & 0 & \bar{N}_3 & 0 & \bar{N}_4 & 0 \\ 0 & \bar{N}_1 & 0 & \bar{N}_2 & 0 & \bar{N}_3 & 0 & \bar{N}_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\{ \bar{d} \} = \{ u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3, u_4, v_4 \}^T \quad (12)$$

3차원 구조를 가지는 범프포일의 변형을 해석하기 위하여 측면과 평면 강성행렬인 식(2)와 식(6)의 행렬 성분을 식(13)의 형태로 조합하고 글로벌 좌표계 x', y', z'과 로컬 좌표계 x, y, z가 Fig. 3과 같을 때 글로벌

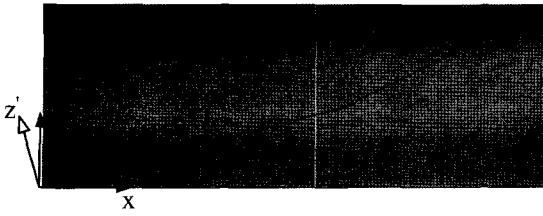


Fig. 3. Local and global coordinate.

별좌표계에서의 강성행렬  $[K']$ 은 식(15)와 같이 식(13)의 강성행렬  $[K]$ 에 변환행렬  $[T]$ 를 곱하여 구하게 된다. 이때 하중벡터  $\{f'\}$ 은 글로벌 좌표계에서의 각 방향의 하중과 모멘트로 구성되며 변위벡터는 식(16)과 같다.

$$[K]= \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & 0 & 0 & \tilde{K}_{12} & \tilde{K}_{13} & 0 & \dots & \tilde{K}_{110} & 0 & 0 & \tilde{K}_{111} & \tilde{K}_{112} & 0 \\ 0 & \tilde{K}_{11} & \tilde{K}_{12} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{K}_{17} & \tilde{K}_{18} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{K}_{21} & \tilde{K}_{22} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{K}_{27} & \tilde{K}_{28} & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{K}_{21} & 0 & 0 & \tilde{K}_{22} & \tilde{K}_{23} & 0 & \dots & \tilde{K}_{210} & 0 & 0 & \tilde{K}_{211} & \tilde{K}_{212} & 0 \\ \tilde{K}_{31} & 0 & 0 & \tilde{K}_{32} & \tilde{K}_{33} & 0 & \dots & \tilde{K}_{310} & 0 & 0 & \tilde{K}_{311} & \tilde{K}_{312} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{K}_{101} & 0 & 0 & \tilde{K}_{102} & \tilde{K}_{103} & 0 & \dots & \tilde{K}_{1010} & 0 & 0 & \tilde{K}_{1011} & \tilde{K}_{1012} & 0 \\ 0 & \tilde{K}_{71} & \tilde{K}_{72} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{K}_{77} & \tilde{K}_{78} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{K}_{81} & \tilde{K}_{82} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{K}_{87} & \tilde{K}_{88} & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{K}_{111} & 0 & 0 & \tilde{K}_{112} & \tilde{K}_{113} & 0 & \dots & \tilde{K}_{1110} & 0 & 0 & \tilde{K}_{1111} & \tilde{K}_{1112} & 0 \\ \tilde{K}_{121} & 0 & 0 & \tilde{K}_{122} & \tilde{K}_{123} & 0 & \dots & \tilde{K}_{1210} & 0 & 0 & \tilde{K}_{1211} & \tilde{K}_{1212} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[K']\{d'\} = \{f'\} \quad (14)$$

$$[K'] = [T]^T[K][T] \quad (15)$$

$$\{d'\} = \{w'_1, u'_1, v'_1, \theta'_3, \theta'_{x1}, \theta'_{y1}, \dots, w'_4, u'_4, v'_4, \theta'_{x4}, \theta'_{y4}\}^T \quad (16)$$

위와 같은 방법으로 Fig. 4와 같이 여러 개의 범프가 서로 연결된 형상으로 격자를 구성하게 된다.

2-3. 범프 변형 계산 결과 비교

공기막내의 발생압력에 의한 범프포일의 변형( $w$ )을 계산하기 위하여 Heshmat[2]은 식(17)와 같이 범프의

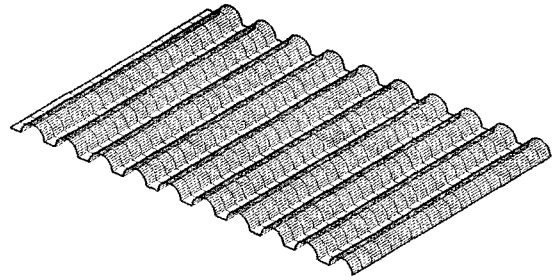


Fig. 4. Connected bump.

컴플라이언스를 사용하였고, 이것은 식(18)처럼 표현된다.

$$w = \alpha(p - p_a) \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{2l_0^3(1 - \nu^2)s}{Et_0^3} \quad (18)$$

또한 Peng[3]은 식(17)에서의 압력  $p$ 를 범프 길이방향 평균값을 사용하여 변형량을 계산하였다. 본 논문에서는 범프의 길이방향으로 Fig. 5처럼 공기막에서 발생하는 압력과 유사한 형태의 하중이 가해졌을 때 범프의 변형을 Heshmat[2]과 Peng[3]이 제시한 변형 계산법을 통해 계산하였고, 이를 2.2에서 기술한 유한요소법으로 계산한 연결된 범프에 대한 결과와 비교하였다. 범프포일의 형상과 물성은 Table 1에 주어진 값과 같다.

Fig. 6은 유한요소법을 통해 계산한 분리된 범프와 연결된 범프에 대한 변형 계산결과이다. Fig. 6(a)를 통해 볼 수 있듯이 범프가 서로 분리된 경우 범프의 수직방향 변형은 가해진 하중과 비슷하게 범프 가운데 부분의 변형이 크고 양쪽 가장자리의 변형은 거의 없

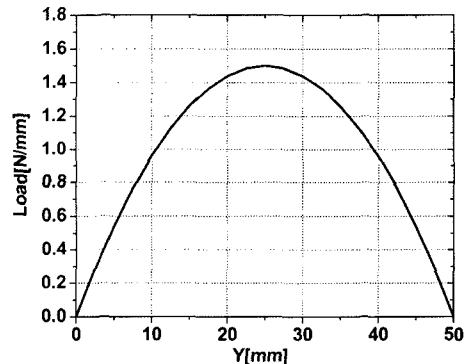
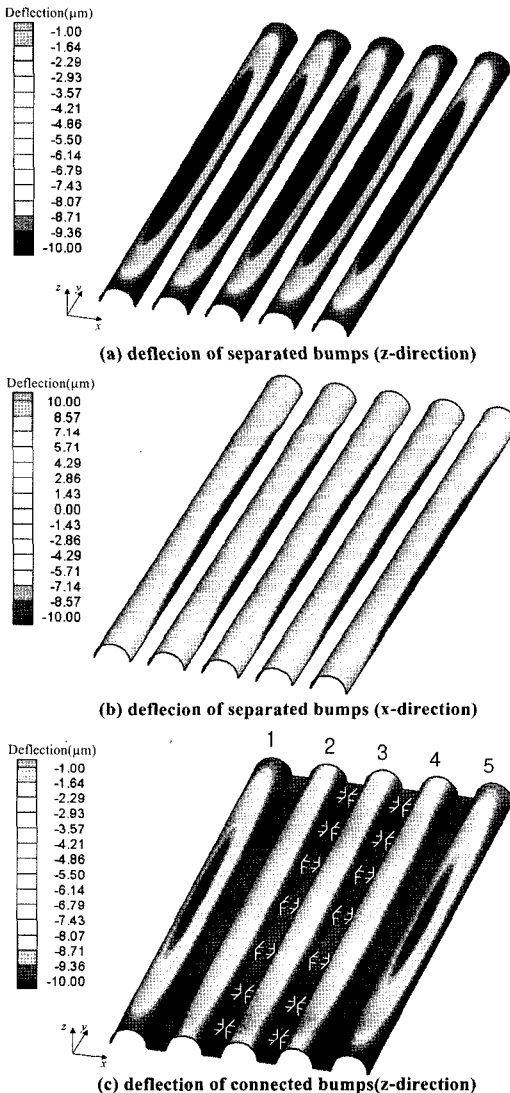


Fig. 5. Parabolic load in longitudinal direction.

**Table 1. Data of bump**

Bump thickness	0.1 mm
Bump length	50 mm
Bump half wave length	1 mm
Young's modulus of bump	200 GPa
Poisson's ratio of bump	0.25

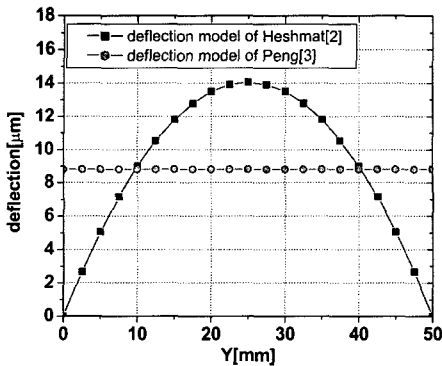


**Fig. 6. Deflection of separated bumps and connected bumps when parabolic load is applied in longitudinal direction.**

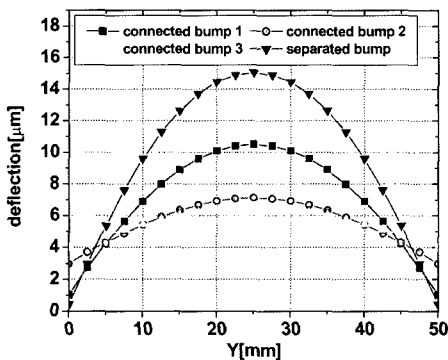
다. 그러나 Fig. 6(c)의 범프가 서로 연결된 경우는 범프가 분리되어있을때와 많은 차이를 보였다. 외곽에 위

치한 1번과 5번 범프는 분리된 범프와 비슷하게 양쪽 가장자리의 변형은 거의 없고 중심 부분의 변형은 컸다. 그러나 중간에 위치한 2, 3, 4번 범프는 외곽에 위치한 1번, 5번 범프에 비하여 변형이 범프 길이방향으로 균일해지는 것을 볼 수가 있다. 이것은 범프가 서로 연결되어 있기 때문에 나타나는 현상이다. 범프가 서로 분리되었을 때 범프와 지면이 만나는 부분의 수평방향(x 방향) 변위는 Fig. 6(b)를 통해 볼 수 있듯이 수직방향 변위와 비슷하게 중심부분의 변형이 크고 양쪽 가장자리의 변형이 작다. 즉, 가운데 부분이 볼록하게 튀어나온 모양으로 변형을 하게 된다. 따라서 범프가 서로 연결이 되면 연결된 부위의 중심 부분에서는 압축 응력이 양쪽 가장자리는 인장 응력이 생기게 되고, 이에 따라 가운데 부분의 변위는 줄어들고 양쪽 가장자리의 변위는 늘어나게 된다. 이로 인하여 범프가 연결되어 있을 때의 수직방향 변위 또한 범프가 분리되어 있을 때 보다 길이방향으로 보다 균일해지게 된다.

Fig. 7은 앞에서 기술한 해석 조건에 대하여 Heshmat [2]과 Peng[3]이 제시한 범프 변형 계산법을 통하여 계산한 결과와 유한요소법을 통하여 계산한 범프 중심부분의 수직방향 변형량을 범프의 길이방향으로 나타낸 그래프이다. Fig. 7(a)에서 Heshmat[2]의 변형 계산법을 통해 계산된 변형은 가해진 하중에 비례하여 가운데 부분의 변형이 크고 양쪽 가장자리는 변형은 없다. 이것은 유한요소법을 통해 계산된 Fig. 7(b)의 분리된 범프의 경우와 비슷한 형태이다. Peng[3]의 변형계산법을 통해 계산한 결과는 하중의 평균값을 사용하여 계산하였으므로 범프의 길이 방향으로 변형량이 모두 동일하다. Fig. 7(b)에서 연결된 범프중 범프 4번은 범프 2번과 변형량이 같고 범프 5번은 1번과 변형량이 같으므로 별도로 기술하지 않았다. 하중이 가장 크게 작용하는 가운데 부분의 변형량은 연결된 범프3번의 경우 6.49 mm이고 분리된 범프의 경우는 15.06 mm이다. 또한 하중이 작용하지 않는 양쪽 끝단의 변형량은 연결된 범프3번의 경우는 3.94 mm이고 분리된 범프의 경우는 0.426 mm이다. 즉, 범프가 서로 연결됨으로서 중심부분의 최대 변형량은 분리된 범프에 비해 57% 감소하였고 양쪽 가장자리의 변형량은 825% 증가 하였다. 이렇게 상호 연결된 범프의 3차원 형상을 고려하여 해석을 수행한 결과 분리된 범프에 비해 길이방향 변형이 균일해 지며, 하중이 작용하지 않는 범프 양쪽 끝단에도 상당히 큰 변형이 생기는 것을 확인



(a) deflection of bump calculated by previously proposed methods



(b) deflection of bump calculated by finite element methods

Fig. 7. Deflection of bump calculated by various methods.

할 수가 있었다. 위의 결과를 통하여 범프 포일의 3차원 형상을 고려하여 포일 베어링의 성능해석을 수행하면 기존의 변형 계산법을 통해 수행한 결과와 많은 차이를 보일 것을 예상할 수가 있다.

### 3. 저널 베어링 정특성 해석

#### 3-1. 저널 베어링 정특성 해석방법

포일저널베어링의 정특성 해석은 식(19)와 같은 무차원 레이놀즈 방정식을 통해 공기막에서 발생하는 압력을 구하고 이를 통하여 하중지지능력을 구하게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( PH^3 \frac{\partial P}{\partial \xi} \right) = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} (PH) \quad (19)$$

이때 무차원 공기막 두께  $H$ 는 식(20)과 같은데  $w(\theta, \xi)$  라고 표기된 부분은 공기막에서 발생한 압력에 의한 범프의 변형량을 나타내며 변형량 계산시 톱포일의 강성은 무시하였다.

Table 2. Data of bearing

Bearing diameter	50 mm
Bearing length	50 mm
Radial clearance	50 μm
No. of bump in circumferential direction	60 EA

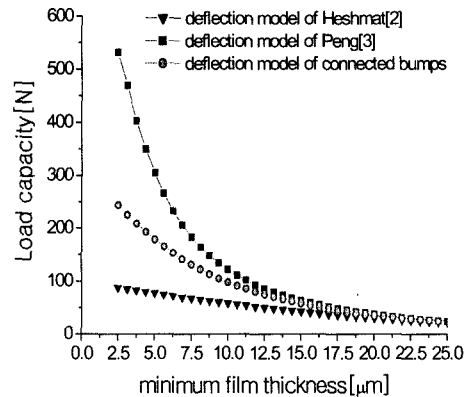


Fig. 8. Load capacity for various bump foil deflection models when bump thickness is 0.05 mm and rotating velocity is 20000 rpm.

$$H = 1 + \epsilon \cos(\theta - \phi) - w(\theta, \xi) \quad (20)$$

범프포일의 변형은 Fig. 4와 같은 연결된 범프에 대하여 2.2에서 기술한 유한요소법을 통하여 계산하였다. 또한, Heshmat[2]과 Peng[3]이 제시한 변형계산법을 통해서 계산한 결과와 서로 비교 하였다. 해석에 사용된 베어링의 치수는 Table 2에 기술 하였다. 이때 사용된 경계조건은 공기막내에서 음압이 발생하면 톱포일이 적절히 변형하여 대기압이 된다는 가정으로 Half Sommerfeld 조건을 사용하였다.

#### 3-2. 정특성 해석결과

Fig. 8부터 Fig. 10은 회전속도가 20000 rpm이고 범프포일의 두께가 0.05 mm, 0.1 mm, 0.15 mm일 때 여러가지 범프포일 변형계산 방법을 사용하여 계산한 하중지지능력을 최소공기막두께를 기준으로 나타낸 것이다. 3가지 범프포일 두께에 대한 결과 모두 Peng[3]의 변형 계산법을 사용한 경우가 같은 최소공기막 두께에 대하여 하중지지능력이 가장 크고 Heshmat[2]의 변형 계산법을 사용한 경우가 가장 작다. 연결된 범프에 대한 변형량을 통해 계산한 결과는 앞의 두 경우의 중간

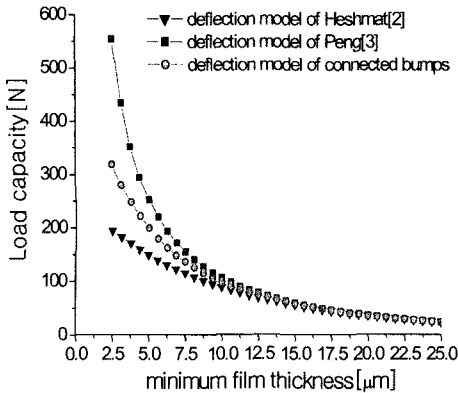


Fig. 9. Load capacity for various bump foil deflection models when bump thickness is 0.1 mm and rotating velocity is 20000 rpm.

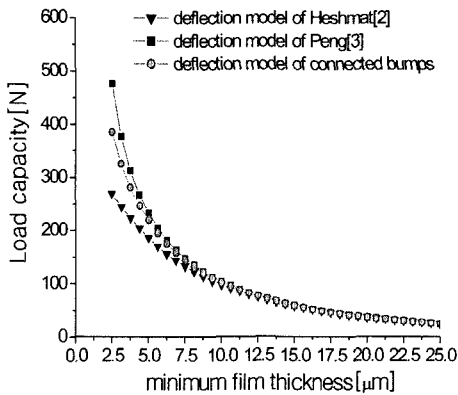


Fig. 10. Load capacity for various bump foil deflection models when bump thickness is 0.15 mm and rotating velocity is 20000 rpm.

정도의 하중 지지능력을 나타냈다. 이러한 범프포일 변형 계산법에 따른 하중지지능력 차이는 범프의 두께가 작고 최소공기막 두께가 작아질 때 더욱 크게 나타났다. 최소 공기막 두께가 5 mm일 때 Peng[3]의 범프포일 변형 계산법을 사용하여 계산한 하중지지능력은 범프포일의 두께가 0.05 mm, 0.1 mm, 0.15 mm일 때 연결된 범프의 변형량을 사용한 경우 보다 각각 70%, 17%, 6% 높았다. 또한 Heshmat[3]의 변형계산법을 사용하여 계산한 하중지지능력은 연결된 범프의 변형량을 사용한 경우보다 각각 57%, 31%, 15% 낮았다.

Peng[3]의 범프포일 변형 계산법은 압력이 적게 발생하는 축방향 양끝의 범프 변형과 압력이 많이 발생하는 축방향 중심부분의 변형이 모두 같다는 가정을

사용한다. 따라서 범프포일 축방향 양끝단의 변형을 실제보다 과장되게 계산을 하며 이로인해 같은 최소공기막 두께에 대한 하중지지능력이 3가지 경우 중 가장 크다. 이에 비해 Heshmat[2]의 변형 계산법은 축방향 양끝단의 범프 변형을 무시하기 때문에 편심율이 1이 넘는 영역의 성능해석은 불가능 하며 또한 같은 최소 공기막두께에 대한 하중지지능력이 3가지 경우중 가장 작다. 모든 범프가 서로 연결되어있는 경우는 범프의 변형이 앞의 두가지 경우의 중간정도이기 때문에 하중 지지능력 또한 중간정도 값을 나타낸다.

위의 결과를 통해 볼 때 범프포일이 가해진 하중에 비례하여 변형한다는 가정이나 축방향 변형이 일정하다는 가정을 통하여 성능해석을 수행한 결과는 실제 범프포일의 형상을 고려하여 수행한 해석 결과와 많은 차이를 보였다. 따라서 보다 정확한 포일베어링의 성능해석을 위해서는 범프포일의 3차원 형상을 고려한 해석이 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 공기막에서 발생된 압력에 의한 범프포일의 변형을 보다 정확하게 계산하기 위하여 유한요소법을 이용하여 범프포일의 3차원 형상을 고려한 변형모델을 제시하였으며 이를 이용한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 범프가 서로 연결이 되었을 때 범프의 변형은 연결된 범프간의 상호 작용에 의해 범프가 분리되어 있을 때 보다 길이 방향으로 균일해 진다.
2. 범프의 3차원 형상을 고려하여 해석을 수행 한 결과는 기존 모델을 사용하여 수행 한 해석 결과와 많은 차이를 보였으며 범프가 하중에 비례하여 변형을 한다는 가정을 사용하여 계산한 결과와 축방향으로 균 일하게 변형을 한다는 가정을 사용하여 계산한 결과의 중간정도 값을 나타내었다.
3. 범프포일의 3차원 형상에 대한 고려가 정확한 포 일베어링의 성능해석을 위해서 필요하며 특히, 편심율이 1이 넘는 영역의 계산을 위해서는 필수적이다.

#### 기호 설명

- $d$  : displacement vector of local coordinate
- $d'$  : displacement vector of global coordinate
- $e$  : eccentricity [mm]

$f$	: load vector of local coordinate
$f'$	: load vector of global coordinate
$s$	: bump foil pitch [mm]
$t_b$	: bump foil thickness [mm]
$D$	: $(E)/(1 - \nu^2)$ bending rigidity
$K$	: stiffness matrix of local coordinate
$K'$	: stiffness matrix of global coordinate
$\tilde{N}$	: shape function for Kirchhoff equation
$\bar{N}$	: shape function for plane stress model
$p$	: pressure [N/mm <sup>2</sup> ]
$p_a$	: absolute pressure [N/mm <sup>2</sup> ]
$u'$	: displacements of foil in $x$ -direction [mm]
$v'$	: displacements of foil in $y$ -direction [mm]
$w'$	: displacements of foil in $z$ -direction [mm]
$\varepsilon$	: $e/c$ , eccentricity ratio
$\xi$	: $z/R$ , dimensionless length axial direction
$\theta$	: $x/R$ , dimensionless angular coordinates
$A$	$(6\eta_r\omega R^2)/(p_a C^2)$ , bearing number

## 참고 문헌

1. Walowit and J.A. Anno, "Modern Development of Lubrication Mechanics" *Applied Science Publishers*, Ltd., London, 1975.
2. H. Heshmat, J.A. Walowit and O. Pinkus, "Analysis of Gas Lubricated Foil Journal bearings," *J. Lubr. Tech. Trans. ASME*, **105**, pp. 638-646, 1983.
3. Z.C. Peng and M.M. Khonsari, "Hydrodynamic Analysis of Compliant Foil Bearings With Compressible Air Flow," *J. Tribology Trans. ASME*, **126**, pp. 542-546, 2004.
4. J.P. Peng and M. Carpino, "Calculation of Stiffness and Damping Coefficients for Elastically Supported Gas Foil Bearings," *J. Tribology Trans. ASME*, **115**, pp. 20-27, 1993.
5. Noboru Kikuchi, "Finite element methods in mechanics," Cambridge University Press, 1986.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 차세대신기술개발 사업(과제번호 10006918)으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.