

## 조도효과를 고려한 다공질 공기베어링의 정강성 특성에 관한 수치해석 연구

권혁록,<sup>1</sup> 이성혁,<sup>\*2</sup> 이재응<sup>2</sup>

### NUMERICAL INVESTIGATION ON STATIC STIFFNESS CHARACTERISTICS OF POROUS AIR BEARING CONSIDERING ROUGHNESS EFFECTS

H.R. Gwon,<sup>1</sup> S.H. Lee,<sup>\*2</sup> J.E. Lee<sup>2</sup>

*This study aims to investigate numerically the static stiffness characteristics of porous air bearing and to estimate appropriate permeability values of porous medium. In particular, a new roughness model is proposed and implemented into the commercial CFD code (FLUENT Ver. 6.2) by using C language based user subroutine. The predicted results are extensively compared with experimental data. The roughness model is also validated through comparison with the results from open literature. It is found that the predictions for static stiffness are in good agreement with experimental data. Therefore, the suggested model based on the roughness Reynolds number can be used in studying the stiffness characteristics of porous air bearing effectively. In addition, numerical simulations of various diameter size and conditions are conducted. According the results, it is expected that the static stiffness of porous air bearing has the non-linear characteristics.*

**Key Words :** 다공질 공기 베어링(Porous Air Bearing), 강성(Stiffness), 투과율(Permeability), 조도 효과(Roughness Effect), 사용자 정의 함수(User Defined Function)

### 1. 서 론

현재 산업 현장에서 사용되고 있는 각종 산업 기계는 대량 생산과 성능 향상 등의 다양한 목적을 위하여 대용량화, 소형 경량화, 고속화를 위한 개발이 추진되고 있다. 특히 반도체 제조장치의 경우에 있어서 반도체의 비약적인 발전에 따라 보다 정밀하고 청정한 제조환경과 장치의 사용기간의 연장이 강하게 요구되어 왔다. 이러한 요구에 따라 최근 공기 베어링의 도입이 점차 늘고 있는 추세이다[1,2]. 공기 베어링에는 다양한 종류가 있으나 베어링 통과 후의 공기의 압력 구배의 균일성이 가장 좋은 다공질 공기 베어링을 많이 사용하고 있다.

다공질 공기 베어링은 접촉이 없고, 점도가 낮으며, 높은 강성과 감쇠비와 같은 많은 장점을 지니고 있다. 따라서 마찰과 마모가 거의 없으며, 이 때문에 높은 속도의 장치 구동이 가능하며, 구동 시 조용하고 부드러운 특성을 가진다.

다공질 공기 베어링은 주입 공기의 압력과 간극에 따라서 그 강성이 달라지는 특성을 가진다. 하지만 실제 공기 베어링의 현장 적용 시 정밀 제어나 조립과정의 어려움으로 인하여 공기 베어링의 실제 간극을 정확히 측정할 수 없는 어려움이 있다. 또한 공기 베어링의 제조사들은 간극에 따른 강성 값을 특정 주입 공기 압력에 대해서 사용자에게 제공하고 있는데 현장에서 사용하는 공기의 압력은 한 가지로 고정되어 있지 않기 때문에 실제로 현장에서 사용하는 압력 변화에 따른 강성의 변화를 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 현장에서 사용되는 공기 베어링의 정강성의 정확한 파악을 위하여 공기 베어링의 수치해석을 수행하였다. 마이크로 간극의 다공질 공기 베어링 해석의 정확도를 높이기 위해서 새로운 조도 모델을 제시하였고, 상용 전산유체해

접수일: 2008년 3월 28일, 심사완료일: 2008년 6월 12일.

1 중앙대학교 대학원 기계공학과

2 중앙대학교 기계공학부

\* Corresponding author, E-mail: shlee@cau.ac.kr

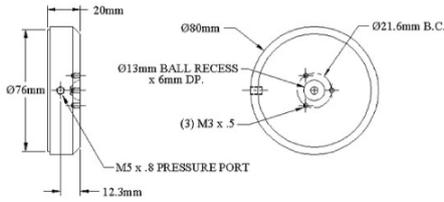


Fig. 1 Engineering drawing of S10 series air bearing of NEWWAY®.

석 프로그램인 FLUENT V.6.2를 이용하여 해석하였다[3]. 예측된 수치해석 결과의 검증을 위하여 정강성 실험 결과와 상호 비교를 하였으며, 이를 통하여 다공질 공기 베어링의 고유한 투과율을 예측하였다.

## 2. 이론 및 수치해석 방법

### 2.1 격자의 생성 및 해석 방법

본 연구에서는 다공질 공기 베어링의 정강성에 대한 수치 해석을 수행하기 위하여, 다공질 공기 베어링의 크기, 간극, 주입 압력 등 다양한 경우에 대하여 수치 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 현재 널리 사용되고 있는 Newway사의 공기 베어링에 대해서 해석을 수행하였으며, Fig. 1에 본 연구에서 사용된 Newway사의 S10시리즈의 80mm 공기 베어링의 도면이 나타나 있다[4]. 이를 참조하여 해석 대상의 형상 모델링과 격자의 생성에는 ANSYS사의 ICEM-CFD V.10.0을 사용하였다[5]. 아래의 Fig. 2에 생성된 격자의 모습을 보여주고 있으며, 축대칭(Axisymmetric)해석을 위해서 축을 기준으로 다공질 공기 베어링의 한쪽 부분만 2차원 모델링 및 격자 생성을 하였다. 격자의 개수는 약 6만개이며 다공질 공기 베어링 위쪽에서의 주입 공기가 베어링을 통과한 후 바닥면에서 바깥쪽으로 진행되는 유동을 살펴보고자 한다. 해석에는 상용 유동해석 프로그램인 ANSYS사의 FLUENT V.6.2를 사용하였다. 공기 베어링의 크기의 변화를 위하여, 지름을 80mm, 40mm, 100mm 그리고 125mm 조건으로 변화시켰고, 각각의 공기 베어링의 지름의 변화에 대하여 베어링과 바닥면과의 간극을 5µm, 10µm, 15µm 그리고 20µm 조건에 대하여 수치해석을 하였으며, 주입 공기 압력을 0.41MPa와 0.55MPa, 두 가지 조건으로 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 수치 해석 시 다공질 공기 베어링 주변 대기 부분의 격자를 충분히 포함시킴으로써 경계조건으로부터 야기되는 해의 부정확성을 배제하였다. 또한 본 연구에서는 투과율의 예측을 위하여 하나의 대표적인 경우인 직경 80mm, 주입 공기 압력 5.5MPa이고 바닥과의 간극이 20µm인 경우에서의 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교 후 투과율을 예측하고 차후의 모든 경우에서 이 값을 일반적으로 사용해서

해석을 수행하였으며, 그 결과는 실험결과와 상호 비교하였다.

### 2.2 조도 효과 모델

일반적으로 관내를 흐르는 유동을 해석할 때 벽면의 조도는 관의 지름에 비하여 상당히 작기 때문에 조도의 영향을 무시할 수 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 바닥면과 공기 베어링 사이의 간극이 수~수십 µm인 경우에는 바닥면에서의 조도의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 바닥면 조도의 영향을 고려한 압력강하 모델을 제시하고 수치해석 결과와 이에 따른 실험결과를 상호 비교하고자 한다.

강성은 일반적으로 가해지는 압력과 그에 따라 변형되는 길이 즉, 본 연구에서는 주입 공기압과 공기베어링과 바닥면과의 간극에 밀접한 관계가 있으며, 다공질 공기 베어링의 경우 바닥면의 조도에 따라 강성 값은 크게 변화함을 알 수 있다. 이 경우 간극의 크기가 10µm인 경우, 베어링 좌, 우로 진행되는 유동의 속도는 대략 100~200m/s에 이름을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 간극의 길이를 고려하면 레이놀즈 수는 약 150으로써 명백히 층류이다. 층류의 경우, 고전 유체역학에서 매크로 스케일에서의 마이크로 단위의 조도는 일반적으로 무시하였다. 이때 층류 원관의 경우 마찰계수  $f$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{\Delta p}{l} \frac{2D}{\rho u_{avg}^2} = \frac{64}{Re} \tag{1}$$

그러나 직경이 수 ~ 수십 µm인 관에서의 수 µm 크기의 조도는 유동이 층류임에도 불구하고 압력강하에 큰 영향을 미치게 된다. 다시 말해서 식 (1)을 통해서 마찰 계수를 구하는 일반적인 방법으로는 더 이상 정확한 해를 얻기 힘들며, 조도 변화에 따른 영향을 상용 유동해석 프로그램으로는 근본적으로 힘들다. 따라서 본 연구에서는 미소 간극에서의 조도에 의해 발생하는 운동량 확산 효과를 고려하기 위하여 이론 연구를 수행하였고, 다음과 같은 조도의 영향에 의한 조도 점성계수  $\mu_R$ 을 적용하였다[6].

$$\frac{\mu_R}{\mu} = A Re_k \frac{y}{k} \left( 1 - \exp\left(-\frac{Re_k y}{k}\right) \right)^2 \tag{2}$$

여기서  $k$ 는 표면 조도들의 평균 높이를 의미하고, 여기서 또한 조도 레이놀즈 수  $Re_k$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$Re_k = \frac{u_k k}{\nu} = \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=h} \frac{k^2}{\nu} \tag{3}$$

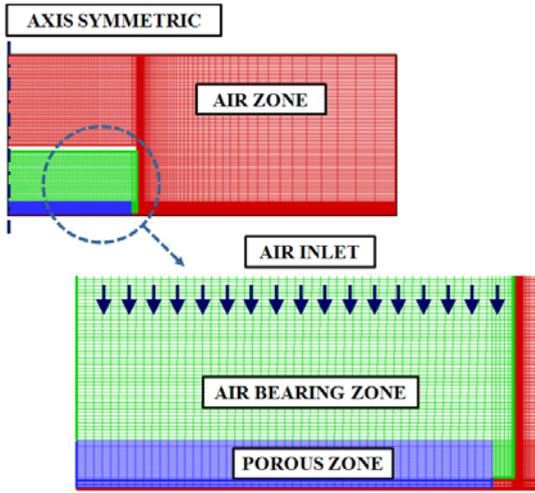


Fig. 2 Grids for numerical simulation.

여기서  $u_k$ 는 조도의 바로 위에서의 속도를 의미한다. 결과적으로 이렇게 구해진 조도 점성계수  $\mu_R$ 을 이용, 운동량 방정식에서의 아래와 같은 식 (4)의 압력 강하 계산에 적용함으로써 조도에 따른 효과를 적용할 수 있다.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_R) \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

그리고 식 (2)에서의  $A$ 는 실험상수이며 일반적으로 참고문헌에서는 실험 결과와 수치 결과의 오차가  $\pm 2\%$  내에 도달하는 값을 적용하였다. 하지만 본 연구에서는 기존 연구를 참고하여[7-8] 아래와 같은 관계식을 본 연구에 맞게 변형하여 적용하였다.

$$A = K \left( \frac{y}{k} \right)^{0.3693} \exp \left( Re \left( 6 \times 10^{-5} \frac{y}{k} - 2.9 \right) \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 변수는  $K$ 이고 여기서  $K$ 는 몇 번의 예비 수치해석을 통하여 알아본 결과 다공질 공기 베어링의 지름과 입구 압력, 그리고 조도에 관한 함수임을 예상할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 방법으로 이러한 여러 가지 인자와 변수  $K$ 와의 관계식을 도출하고자 하였다. 첫째 방법은 다공질 공기 베어링의 지름의 크기와 주입 압력 조건을 각각 80mm와 5.5bar로 고정하고 조도의 변화에 따른  $K$ 의 상관식을 찾는 방법이다. 먼저 평균 조도  $k$ 가 각각  $3.2\mu\text{m}$ 과  $6\mu\text{m}$ 일 때 바닥과 다공질 공기 베어링과의 간극  $h$ 에 따른  $K$ 를 시행착오법(Trial and error method)에 의해서 찾은 후 이렇게 구해진  $K$ 와 간극  $h$ 와의 관계식을 2차 다항식으로 맞춰보면 식 (6)의 형태로 나타남을 알 수 있다.

$$K = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 \quad (6)$$

하지만 이 방법만으로는 다공질 공기 베어링의 지름에 따른  $K$ 의 관계를 적용할 수 없기 때문에 추가적으로 조도와 입구 압력을 고정시킨 경우에서의 다공질 공기 베어링의 지름에 따른  $K$ 의 변화를 살펴보았다. 평균 조도  $k$ 는  $3.2\mu\text{m}$ , 주입공기의 압력은 5.5bar로 고정시킨 상태에서 다공질 공기 베어링의 지름을 40mm에서 125mm로 다양하게 변화시키면서  $K$ 의 값의 변화를 살펴보기 위해서 마찬가지로 각각의 다공질 공기 베어링의 지름  $d$ 에 따른  $K$ 의 변화를 4차 다항식으로 맞춰보면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 식을 간극과 조도의 비  $h/k$ 에 관한 다항식으로 다시 맞추게 되면 식 (8)과 같이 나타남을 알 수 있다. 마찬가지로 이렇게 구한 변수  $K$ 에 대한 관계식을 이용하여 표면 조도의 효과를 수치해석에 고려하여 다공질 공기 베어링의 해석을 수행하였다. 최종적으로 이렇게 정해진  $K$ 와  $A$ , 그에 따른 조도 점성계수  $\mu_R$ 을 상용 유체 해석 프로그램인 FLUENT에 UDF(User define function)을 이용, C언어를 기반으로 한 서브루틴(Sub-routine)을 개발하여 적용하였다.

$$K = b_0 + b_1 d + b_2 d^2 + b_3 d^3 + b_4 d^4 \quad (7)$$

$$K = \left( c_0 + c_1 \left( \frac{h}{k} \right) + c_2 \left( \frac{h}{k} \right)^2 \right) + \left( e_0 + e_1 \left( \frac{h}{k} \right) + e_2 \left( \frac{h}{k} \right)^2 \right) d + \left( f_0 + f_1 \left( \frac{h}{k} \right) + f_2 \left( \frac{h}{k} \right)^2 \right) d^2 + \left( g_0 + g_1 \left( \frac{h}{k} \right) + g_2 \left( \frac{h}{k} \right)^2 \right) d^3 + \left( i_0 + i_1 \left( \frac{h}{k} \right) + i_2 \left( \frac{h}{k} \right)^2 \right) d^4 \quad (8)$$

### 3. 실험방법

실험은 Newway사의 다공성 공기 베어링에 로드셀(Load cell)과 간극 센서를 부착하여 수행하였으며, 주입 공기는 콤프레서(Compressor)와 공기 필터, 그리고 레귤레이터를 이용하여 주입된다. 샤프트에 다공성 공기 베어링을 부착하여 가이드 면과의 평행을 유지하는 형태로 되어 있다. 전체적인 실험 장치의 사진과 로드셀과 베어링의 체결 형태가 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있으며, 그림에서 볼 수 있듯이 로드셀과 다공질 공기 베어링의 체결은 강구(Stainless steel ball)를 이용하였다. 강구에 하중의 작용점으로 사용하는 홈을 가공한 후 베어링과 연결하였다. 또한 Fig. 5는 간극 센서를 위해 제작된 지그를 보여주고 있다. 이 장치를 이용하여 하중에 의한 실험장치



Fig. 3 Entire experimental setup for measuring load and gap.

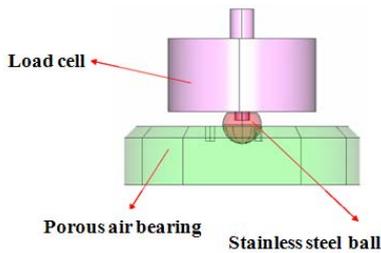


Fig. 4 Connection with load cell and porous air bearing using stainless steel ball.

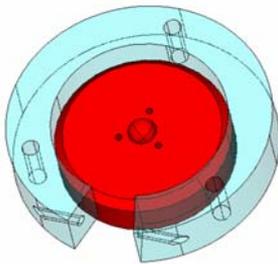


Fig. 5 Porous air bearing jig for gap sensor.

의 변형에도 정확한 공기 베어링의 간극을 측정하였다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 다공질 공기 베어링의 유동 분포 및 특성

공기 베어링의 지름 80mm, 주입 공기 압력 4.1 bar, 바닥면의 평균 조도가 3.2 $\mu$ m, 그리고 바닥과의 간극이 10 $\mu$ m인 경우 다공질 공기 베어링을 통해서 분출되는 공기의 압력 분포를 살펴보면 Fig. 6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 주입된 공기

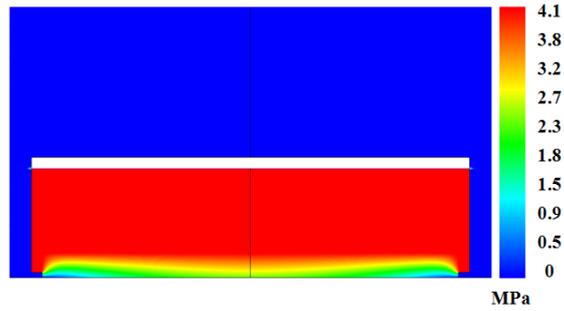


Fig. 6 Pressure contour of porous air bearing.

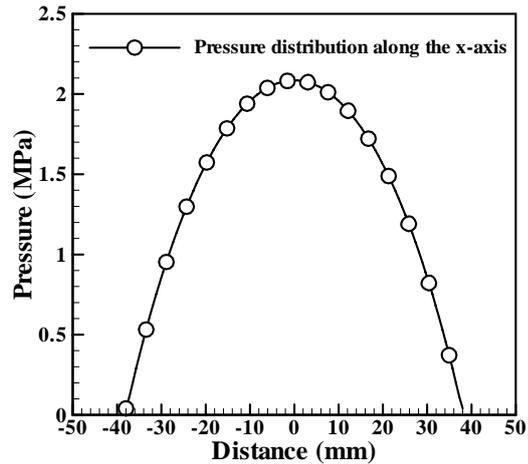


Fig. 7 Pressure distribution along the x-axis.

는 다공질 층(Porous medium)에서 급격히 압력이 강해지는 것을 알 수 있으며, 또한 반지름 방향의 압력의 분포를 살펴보면 Fig. 7과 같으며 반지름 방향으로 공기 베어링의 바깥 방향으로 압력이 일정하게 감소함을 알 수 있고 유동이 층류이기 때문에 전체적인 압력 분포도 일정하게 변화함을 알 수 있다.

##### 4.2 다공질 공기 베어링의 정강성 특성

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 사용한 다공질 에어 베어링의 투과율(Permeability)은 한 가지 경우에 대해서 실험과 비교하여 값을 찾아낸 후 그 값을 다른 모든 수치해석의 경우에 일관적으로 사용하였다. 실제로 다공질 공기 베어링의 투과율은 재료 특성 및 공정 방법에 따른 다공의 직경에 따라서 변하기 때문에 실험적으로 예측하기는 매우 어려울 뿐만 아니라 다공질 공기 베어링 내의 유로 특성 및 재질 특성을 국부적으로 모두 고려하는 것은 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서 예측된 투과율은 근본적으로 공기 베어링의 고유 투과율이라고 평가하기 보다는 오히려 다양한 불확정적인 변

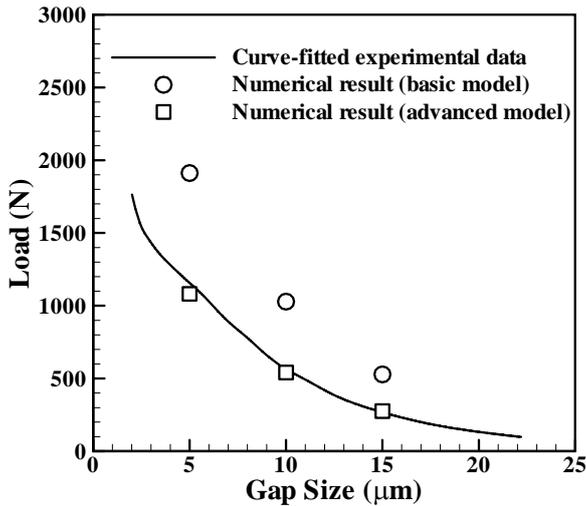


Fig. 8 Comparison of load with numerical result and curve-fitted experimental data ( $P_m = 4.1\text{bar}$ ,  $k = 3.2\mu\text{m}$ ).

수들을 하나의 해석 파라미터로 흡수한 실험 상수라고 판단하는 것이 보다 더 타당할 것이다. 본 연구에서는 베어링의 직경이 80mm, 간극 5 $\mu\text{m}$ , 그리고 주입 압력이 4.1bar인 경우를 기준으로 투과율을 실험결과와 상호 비교하여 예측하였고 그 값은  $1.17 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 이다.

Fig. 8은 주입 압력이 4.1bar인 조건에서 바닥면에서 작용하는 힘의 실험과 수치해석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 원형 기호와 사각형 기호는 각각 조도의 영향을 고려하지 않은 상태에서의 수치해석 결과와 조도의 영향을 고려한 점성계수를 사용하여 계산한 결과이다. 실험 및 수치해석에서 사용한 Graphite의 바닥면의 평균 조도는 3.2 $\mu\text{m}$ 이다. 그리고 Table 1은 실험과 조도의 영향을 고려한 수치해석 값의 상대 오차를 나타낸 것이다. 이상에서 알 수 있듯이 기존의 수치해석 방법으로는 실험과 크기는 40%가 넘는 상당한 오차가 발생할 수 있음을 보여주고 있으며, 조도의 영향을 고려한 점성계수의 사용 시 실험과 수치해석의 결과가 7%이내로 상당히 일치하는 것을 보여주고 있다.

이를 바탕으로 나머지 경우에 대해서 본 연구에서 접근하는 조도의 영향을 고려한 다공질 공기베어링의 정강성 수치

Table 1 Relative error of load with the numerical result (advanced model) and experiment data

Gap ( $\mu\text{m}$ )	Numerical result (N)	Experimental data (N)	Relative Error (%)
5	1342.24	1256.18	6.85
10	542.17	535.73	1.20
15	280.68	275.24	1.97

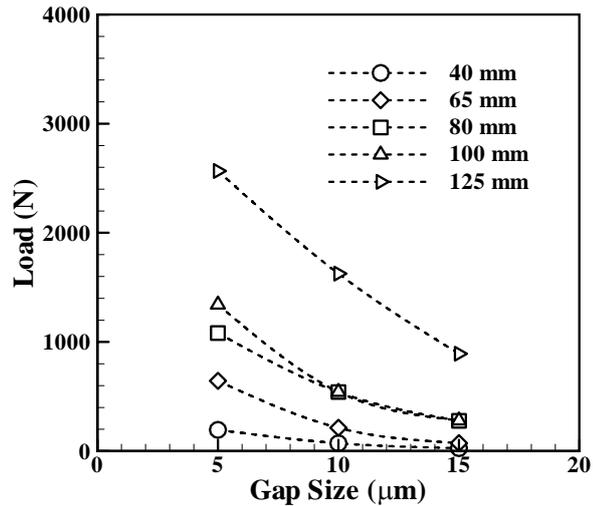


Fig. 9 Load capacity curve of porous air bearing ( $P_m = 4.1\text{bar}$ ,  $k = 3.2\mu\text{m}$ ).

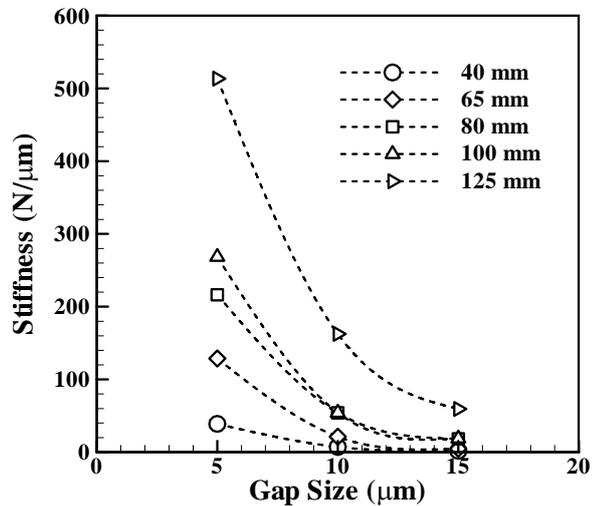


Fig. 10 Stiffness curve of porous air bearing ( $P_m = 4.1\text{bar}$ ,  $k = 3.2\mu\text{m}$ ).

해석에 있어서 방법적 타당성을 확보하였음을 판단할 수 있다.

주입 압력이 4.1bar이고 바닥면의 조도가 3.2 $\mu\text{m}$ 인 경우 각각의 다공성 공기 베어링의 지름에 대한 수치해석의 결과가 Fig. 9와 10에 나타나 있다. Fig. 9는 하중 능력 곡선(Load capacity curve)을, Fig. 10은 강성 곡선(Stiffness curve)을 나타내고 있으며 그림에서 알 수 있듯이 다공질 공기 베어링의 크기에 따라서 강성 특성이 비선형적으로 나타난다.

또한 주입 압력이 5.5bar이고 바닥면의 조도가 3.2 $\mu\text{m}$ 인 경우도 마찬가지로 하중 능력 곡선과 강성 곡선이 Fig. 11과

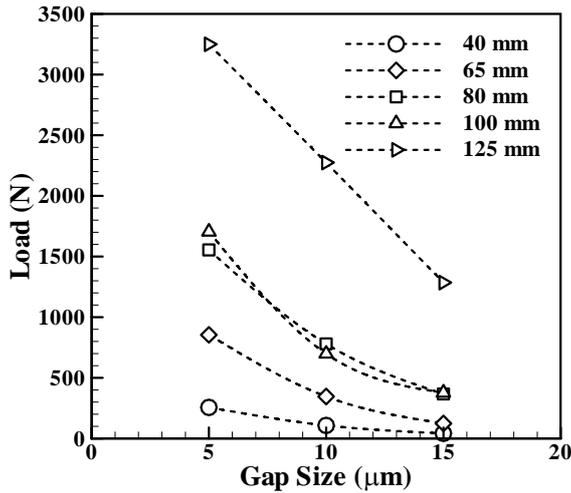


Fig. 11 Load capacity curve of porous air bearing ( $P_{in} = 5.5\text{bar}$ ,  $k = 3.2\mu\text{m}$ ).

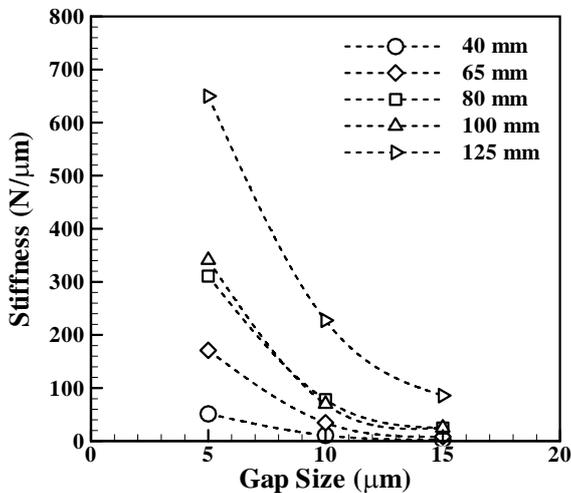


Fig. 12 Stiffness curve of porous air bearing ( $P_{in} = 5.5\text{bar}$ ,  $k = 3.2\mu\text{m}$ ).

Fig. 12에 나타나 있다. 주입 압력이 클수록 바닥면에 걸리는 하중은 커지는 것을 알 수 있으며, 4.1bar의 경우와 비슷한 비선형적인 강성 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 주입 압력이 증가함에 따라서 강성은 증가함을 Fig. 10과 Fig. 12를 통해서 살펴볼 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 다양한 적용 분야를 가지고 있는 다공성 공기 베어링의 정강성 특성을 살펴보기 위하여 다양한 크기 및 입구 압력조건에 대하여 수치해석을 이용하였고, 해석의 타당성을 확인하기 위해서 실험과의 비교를 수행하였다.

수치해석에 있어서는 기존의 상용 프로그램에 조도 점성계수를 고려한 부분을 사용자 지정 함수를 이용하여 C언어를 통하여 서브루틴으로 개발하여 적용하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 실험과 수치해석의 비교 결과 조도 점성계수를 고려한 수치해석 방법의 타당성을 확보하였다.
- (2) 현장에서 사용할 수 있는 다양한 크기 및 경계 조건에 대하여 다공성 공기베어링의 수치해석을 수행함으로써 비선형적인 강성 특성을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] 1999, Zeng, et al., "Slider Air Bearing Designs for Load/Unload Applications," *Tribology Transactions*, Vol.35, pp.746-751.
- [2] 2005, Qide, Z. et al., "Air Bearing Spindle Motor for Hard Disk Drives," *Tribology Transactions*, Vol.48, pp.468-473.
- [3] 2007, *FLUENT V.6.2 User's Manual*, FLUENT Inc.
- [4] 2008, "http://www.newwayairbearing.com," NEWWAY®.
- [5] 2007, *ICEMCFD V.10.0 User's Manual*, ANSYS Inc.
- [6] 1998, Gh, M.M. and Dongqing, L., "Flow Characteristics of Water in Microtubes," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.20, pp.142-148.
- [7] 1974, Merkle, C.L., et al., "An Analytical Study of the Effects of Surface Roughness on Boundary-Layer Transition," *AF Office of Scien. Res. Space and Missile Sys. Org.*, AD/A004786.
- [8] 2005, Croce, G. and D'Agaro, P., "Numerical Simulation of Roughness Effect on Microchannel Heat Transfer and Pressure Drop in Laminar Flow," *Journal of Physics B: Applied Physics*, Vol.38, pp.1518-1530.