

조도효과를 고려한 다공질 공기베어링의 강성 특성에 관한 수치 해석 연구

Numerical Investigation on Static and Dynamic Stiffness Characteristics of Porous Air Bearing Considering Roughness Effects

권혁락·노경철·정순철·심형삼·홍사훈·이성혁**·이재응**·지홍규***·이동진***·류제형***·최형길***·김혁***

Hyuk Rok Gwon, Kyung Chul Roh, Soon Chul Jung, Hyung Sub Shim, Sa Hoon Hong, Seong Hyuk Lee, Jae Eung Lee, Hong Kyu Ji, Dong Jin Lee, Je Hyoung Ryu, Hyoung Gil Choi, Hyuk Kim

Key Words : Porous air bearing (다공질 공기베어링), Stiffness (강성), Permeability (투과율), Roughness effect (조도효과)

ABSTRACT

This study aims to investigate numerically the static and dynamic 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). The predicted results are extensively compared with experimental data for static cases. The roughness model is also validated through comparison with the results from open literature. For the dynamic cases, the deforming and re-meshing technique is used for describing fluid-solid interactions. It is found that the predictions for static stiffness are in good agreement with experimental data and the dynamic stiffness appears to be relatively smaller than the static stiffness. In addition, moving and dynamic analysis of air bearing seems to be possible to provide qualitative predictions even if there are somewhat discrepancies quantitatively, compared to experimental data.

1. 서론

현재 산업 현장에서 사용되고 있는 각종 산업 기계는 대량 생산과 성능 향상 등의 다양한 목적을 위해서 대용량화, 소형경량화, 고속화를 위한 개발이 추진되고 있다. 특히 반도체 제조장치의 경우에 있어서는 반도체의 비약적인 발전에 따라 청정한 제조환경과 장치의 사용기간의 연장이 강하게 요구되어 왔다. 이러한 요구에 따라 최근 공기 베어링의 도입이 점차 늘고 있는 추세이다. 공기 베어링에는 다양한 종류가 있으나 현재 베어링을 통과한 후의 공기의 압력 구배가 균일한 다공질 공기 베어링을 많이 사용하고 있다.

다공질 공기 베어링은 접촉이 없고, 점도가 낮으며, 높은 강성과 감쇠를 갖는 등 많은 장점을 가진다. 따라서 마찰과 마모가 없으며, 높은 속도로써 구동이 가능하며, 조용하고 부드러운 구동특성을 가진다.

다공질 공기 베어링은 주입 공기의 압력과 간극에 따라서 그 강성이 달라지는 특성을 가진다.

그런데 실제 공기 베어링의 사용시에는 정밀 제어나 조립과정의 어려움으로 공기 베어링의 간극이 정확히 얼마인지를 알 수 없는 문제점이 있다. 또한 현재 현장에서는 외국 업체에서 제작한 다공질 공기 베어링을 사용하고 있는데 이러한 업체에서는 특정한 주입 공기의 압력에 따른 데이터기의 압력을 특정한 경우에 한정하여 간극에 따른 강성값들을 제공하고 있다. 하지만 현장에서 사용하는 공기의 압력은 강성을 바로 알 수 있는 이 특정 압력이 아닌 다른 압력으로 공기를 주입하여 사용한다. 따라서 실제 사용하는 압력 변화에 따른 강성을 알아 보아야 할 필요가 있다. 본 연구는 현장에서 사용되는 공기 베어링의 정확한 강성을 파악하기 위하여 공기 베어링의 수치 해석을 수행한다. 특히 다공질 공기 베어링 해석의 정확도를 높이기 위해 새로운 조도 모델을 제시하였고 상용 CFD 코드인 Fluent.inc의 FLUENT를 이용하여 해석한다. 예측된 수치 해석 결과의 검증을 위해서 다양한 정강성 실험 결과와 상호 비교를 통하여 다공질 공기 베어링의 고유 투과율을 예측한다 그리고 다공질 공기 베어링의 동강성 특성에 대해 알아보기 위해서 수치해석을 수행하고 이 때 유체와 고체의 상호작용 문제를 해결하기 위해 격자의 변형 및 재생성 기법을 이용하였다. 또한 실제 현장에서 요구되는 다공질 공기 베어링의 이송시의 해석을 수행하고 이에 대한 결과를 논의한다.

† 중앙대학교 대학원
E-mail : hrgwon99@gamil.com
Tel : (02) 820-5332, Fax : (02) 814-9476

* 중앙대학교 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

*** 삼성전자㈜ 생산기술 연구소

2. 해석 방법 및 조도 효과 모델

2.1 해석 방법

다공질 공기 베어링의 정강성과 동강성, 그리고 이송에 대한 수치 해석을 수행하기 위하여 다공질 공기 베어링의 크기, 간극 사이즈, 압력 등 다양한 경우에 대하여 수치 해석을 수행하였다. 우선 수치 해석 시에 사용한 프로그램으로는 형상의 모델링과 격자의 생성에 ICEM-CFD 를 사용하였고[1], 유동의 해석에는 상용 프로그램인 FLUENT 를 이용하였다[2]. 본 연구는 Fig. 1 에서와 같이 2 차원 축 대칭 해석을 수행하였고, 지름 80mm 인 다공질 공기 베어링에 대하여 간극 5 μm , 10 μm , 15 μm , 20 μm 조건에 대하여 두 가지 압력조건 0.41MPa, 0.55MPa 에 따른 수치해석을 수행하였다. 추가적으로 전체적인 하중과 간극 사이의 경향을 알아보기 위해서 지름 40mm, 100mm, 125mm 의 조건에 대해서도 지름 80mm 의 조건과 동일하게 수치해석을 수행하였다.

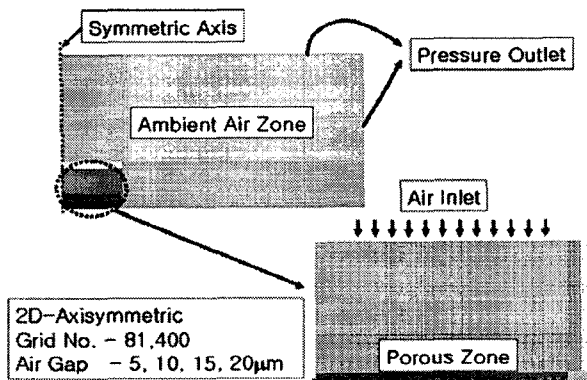


Fig. 1 The grid system and boundary conditions.

정강성에 대한 해석은 하나의 대표적인 경우에 대하여 수치 해석을 수행하여 실험 결과와 비교한 후 차후의 모든 수치 해석에 사용되는 투과율(permeability)를 예측하였다. 해석의 일관성을 위하여 예측된 투과율을 모든 경우에 대하여 일관적으로 사용하여 해석을 수행하였으며 그 결과는 실험 결과와 상호 비교하였다. 예비적 해석 결과를 통해 공기 베어링의 공기 출구의 경계조건에 따라서 압력 강하의 예측 값이 크게 변함을 알 수 있었고, 따라서 본 연구에서는 Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 수치 해석 시에 다공질 공기 베어링 주변 영역의 격자도 포함시킴으로써 경계조건으로부터 야기되는 해의 부정확성을 배제하였다.

동강성 해석(dynamic stiffness analysis)에 있어서는 FLUENT 에서 제공하는 6 자유도 해석 방법(6 DOF analysis)을 채택하였다. 또한 동강성의 경우와 이송의 경우는 유체/고체 상호작용 문제를 해결하기 위하여 격자의 변형 및 재생성 기법을 이용하였다.

2.2 조도 효과 모델

일반적으로 관내를 흐르는 유동을 해석할 때에 벽면의 조도는 관의 지름에 비하여 조도가 상당히 작기 때문에 무시할 수 있다. 하지만 본 연구와 같이 간극이 수 μm 인 경우에는 조도에 의한 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 벽면 조도에 따른 압력강하 모델을 제시하고 FLUENT 해석 결과와 실험 결과를 상호 비교하였다.

실제로 다공질 공기 베어링에서 바닥면의 조도에 따라 강성값은 크게 변화한다. 다공질 공기 베어링의 경우, 간극의 크기가 약 10 μm 정도라고 가정할 때, 좌우로 퍼져가는 공기의 속도는 대략 100 ~ 200m/s 에 이른다(정적 상태의 해석결과를 기준함). 그럼에도 불구하고 간극의 크기를 고려하면 레이놀즈 수는 상대적으로 작기 때문에 유동은 명백히 층류이다. 층류의 경우, 고전 유체역학에서 매크로 스케일에서의 마이크론 단위의 조도는 거의 무시하여 왔다. 고전 유체역학에서는 층류 원관의 경우 마찰계수 f 를 다음과 같이 나타낸다.

$$f = \frac{\Delta P}{l} \frac{2D}{\rho u_{avg}^2} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (1)$$

그러나 직경이 수~수십 μm 인 관에서의 수 μm 의 조도는 유동이 층류임에도 불구하고 압력강하에 중요한 영향을 미치게 된다. 다시 말해서 식(1)을 통해서 마찰계수를 구하는 방법으로는 더 이상 정확한 해를 얻기 힘들며, 조도 변화에 따른 영향을 상용 프로그램인 FLUENT 로 해석하는 것이 근본적으로 힘들다. 따라서 본 연구에서는 미소 간극에서의 조도에 의해 발생하는 운동량 확산 효과를 고려하기 위해 이론 연구를 수행하였고 다음과 같은 조도에 의한 점성 계수를 사용하여 해석을 수행하였다. [3~5]

$$\frac{\mu_R}{\mu} = A \text{Re}_k \frac{y}{k} \left(1 - \exp\left(-\frac{\text{Re}_k y}{\text{Re} k}\right) \right)^2 \quad (2)$$

$$Re_k = \frac{U_k k}{\nu} = \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=h} \frac{k^2}{\nu} \quad (3)$$

여기서 $k = \varepsilon^* H$ 를 나타내며 간극의 높이 H 에 대한 상대적인 평균 조도를 나타낸다. 또한 실험 상수 A 는 형상 혹은 유동 특성에 대한 함수로서 실험을 통해서 결정될 수 있다. 하지만 본 연구에서는 상수 A 는 문헌의 값[3]을 다음과 같이 변형하여 사용하였다.

$$A = C_1 \left(\frac{H}{k} \right)^m \exp \left\{ Re \left(C_2 \frac{H}{k} - C_3 \right) \right\} \quad (4)$$

여기서 $C_1 = 0.1306$, $C_2 = 6 \times 10^{-5}$, $C_3 = 0.0029$ 이며 갭의 높이와 조도와 의 비의 지수 $m = 0.3693$ 이다. 한편 유동의 완전 발달을 가정하면 압력 변화는 식(5)와 같이 나타나며 본 연구에서는 FLUENT 의 점성계수를 수정하는 서브루틴을 개발하여 처리하였다.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_R) \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (5)$$

하지만 문헌의 값[3]은 다공질 에어 베어링에 대한 조도 효과 해석 모델이 아니라 원형 관에서의 경우이다. 또한 기존의 모델을 사용할 경우 베어링의 지름이 80mm 인 경우를 제외하고는 실험 값과 오차가 많이 발생하였다. 기존의 모델을 Order of Magnitude 로 해석한 결과 표면 조도 효과 모델에서 식(4)의 상수 A 가 가장 중요한 인자라고 가정하고 기존의 모델을 해석 결과값과 실험값을 fitting 함으로써 표면 조도 효과 모델의 변경된 관계식을 얻을 수 있었다. 식(6)은 본 연구에서 적용한 상수 A 에 대한 관계식이다.

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

여기서 K 는 몇 가지 수치 해석을 통하여 알아본 결과 다공질 공기 베어링의 지름과 입구 압력, 그리고 조도에 관한 함수임을 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 방법으로 이러한 여러 가지 인자와 K 와의 관계식을 도출하였다. 첫째 방법은 다공질 공기 베어링의 지름과 입구 압력 조건을 각각 80mm 와 5.5bar 로 고정하고 조도의 변화에 따른 K 의 상관식을 찾는 방법이다. 먼저

Fig. 2 는 조도에 따른 상수 K 를 시행착오법(Trial and error method)에 의해서 찾은 것이고, 이때 구해진 K 의 상관식을 curve-fitting 하여 각각의 조도에 따른 a_0, a_1, a_2 를 구하고 다시 이 계수들을 curve-fitting 하면 적절한 상수를 찾을 수 있다.

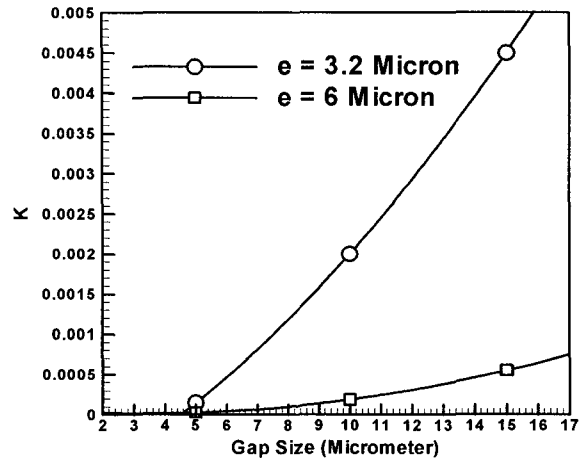


Fig. 2 Roughness effects on loads at the fixed diameter and pressure

$$K_{3.2\mu m} = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 \quad (7)$$

$$a_0 = -1.05 \times 10^{-3} \quad (7a)$$

$$a_1 = 1.75 \times 10^{-4} \quad (7b)$$

$$a_2 = 1.29 \times 10^{-5} \quad (7c)$$

$$K_{6\mu m} = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 \quad (8)$$

$$a_0 = 6.249 \times 10^{-5} \quad (8a)$$

$$a_1 = -2.674 \times 10^{-5} \quad (8b)$$

$$a_2 = 3.949 \times 10^{-6} \quad (8c)$$

이렇게 구한 상수 K 값을 표면 조도 효과 모델로 다공질 공기 베어링을 해석하였다.

하지만 이 방법만으로는 다공질 공기 베어링의 지름에 대한 상수 K 의 상관식을 구할 수 없기 때문에 추가적으로 조도와 입구 압력을 고정시킨 경우에서의 다공질 공기 베어링의 지름에 따른 상수 K 의 변화를 살펴봐야 한다. 조도는 3.2 μm 로 입구 압력을 5.5bar 로 고정시킨 조건 하에서 다공질 공기 베어링의 지름의 변화에 따른 상수 K 의 변화를 살펴보면 Fig. 3 의 경향을 보인다. 마찬가지로 각각의 지름에 따라 curve-fitting 을 하고 그 데이터를 각각의 간극(5, 10, 15 μm)에 대하여 다시 curve-fitting 하면 식(9)과 같이 상수 K 와 다공질 공기 베어링의 지름에 대한 상관식을 얻을 수 있

다. 또한 각각의 간극에 따른 curve-fitting 을 수행 하면 그리고 상수 K 와 다공질 공기 베어링에 관한 상관식을 얻을 수 있고 이 식을 H/ε 에 관하여 curve-fitting 하게 되면 최종적으로 식(10)과 같은 상관식을 얻을 수 있다.

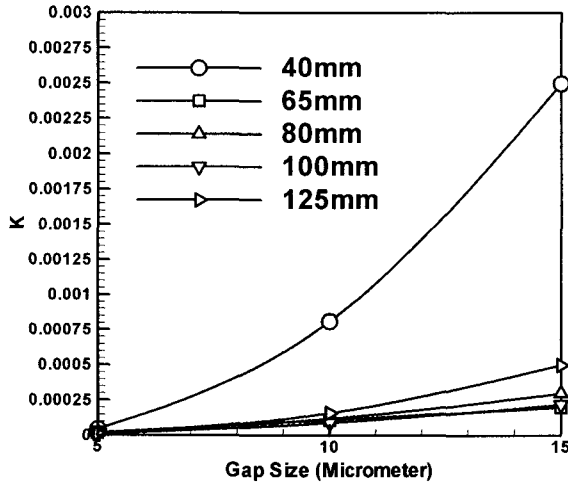


Fig. 3 K with increasing diameter (5.5 bar)

$$K = A_0 + A_1D + A_2D^2 + A_3D^3 + A_4D^4 \quad (9)$$

$$K = \left(B_0 + B_1 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right) + B_2 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right)^2 \right) + \left(C_0 + C_1 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right) + C_2 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right)^2 \right) D + \left(E_0 + E_1 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right) + E_2 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right)^2 \right) D^2 + \left(F_0 + F_1 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right) + F_2 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right)^2 \right) D^3 + \left(G_0 + G_1 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right) + G_2 \left(\frac{H}{\varepsilon} \right)^2 \right) D^4 \quad (10)$$

마찬가지로 이렇게 구한 상수 K 값을 표면 조도 효과 모델로 다공질 공기 베어링을 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 다공질 공기 베어링의 정강성 특성

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서의 투과율은 하나의 경우에 대해서만 실험과 맞추어 고정된

값을 모든 해석 경우에 일관적으로 사용하였다. 실제로 공기 베어링의 재료 특성에 따른 투과율을 실험적으로 예측하기는 매우 어려울 뿐만 아니라 다공질 공기 베어링내의 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 변수들을 하나의 해석 파라미터로 흡수한 실험 상수라고 판단하는 것이 보다 타당한 설명이 될 것이다. 본 연구에서는 $5 \mu\text{m}$ 갭에 대해 0.41MPa 의 공기압을 기준으로 투과율을 예측하였고 실험결과와 상호 비교한 결과 8.5×10^{-14} 로 나타났다. Fig. 4 와 5 는 입구 압력을 각각 4.1bar, 5.5bar 의 조건에서 조도가 $3.2 \mu\text{m}$ 일 때 실험과 수치해석 결과를 보여주고 있으며 Table 1 과 2 는 결과의 상대오차를 나타낸 것이다.

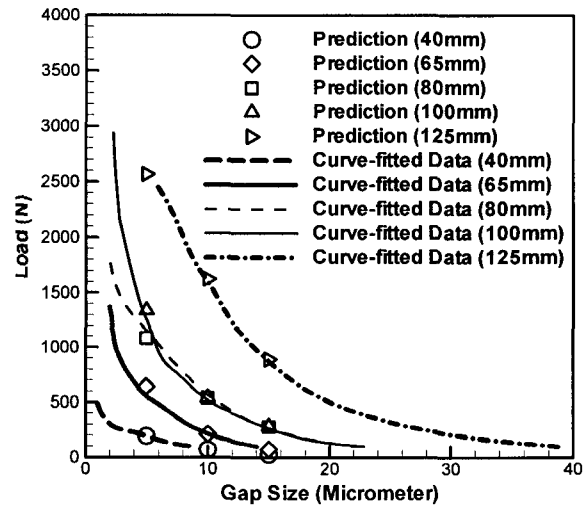


Fig. 4 Comparison of the predictions with the curve fitted data on air bearing's diameters (4.1 bar)

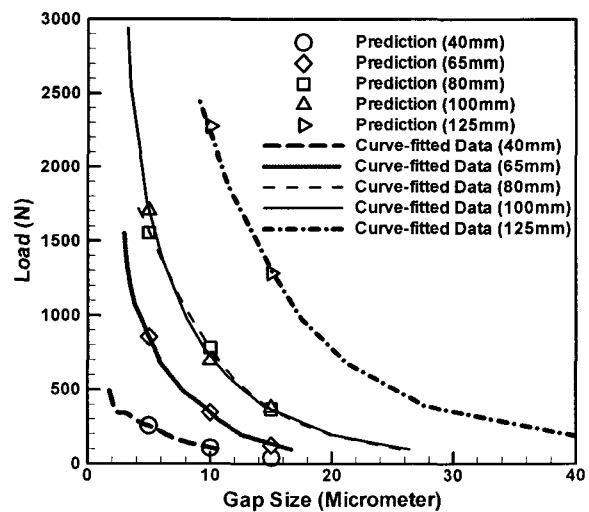


Fig. 4 Comparison of the predictions with the experimental data on air bearing's diameters (5.5bar)

Gap (μm)	Prediction (N)	Exp. Data (N)	% Error
5	1342.24	1256.18	6.85 %
10	542.17	535.73	1.20 %
15	280.68	275.24	1.97 %

Tab. 1 Relative error with the predictions and experimental data (4.1bar)

Gap (μm)	Prediction (N)	Exp. Data (N)	% Error
5	1705.2	1712.42	0.42 %
10	698.98	728.47	4.05 %
15	377.94	370.09	2.12 %

Tab. 2 Relative error with the predictions and experimental data (5.5bar)

전체적으로 실험과 수치 해석의 상대 오차는 상당히 작음을 알 수 있었고 본 연구에서 사용한 조도 효과 모델이 상당히 우수한 결과를 도출해 낼 수 있었다.

3.2 다공질 공기 베어링의 동적 특성 해석

다공질 공기 베어링의 동적 특성을 분석하기 위해서 본 연구에서는 수치해석 기법을 연구하였다. FLUENT 에서 사용되는 6 자유도 해석 기법을 응용하여 다공질 공기 베어링의 수직방향 진동 특성을 해석하였고 이후 동강성 특성 분석에서 유용하게 이용하였다. 수치 해석은 80mm 지름을 가진 다공질 공기 베어링에 대해서 수행되었고 Fig. 5(a)~5(b)에서 볼 수 있듯이 격자 변형 및 재생성 기법을 삼각형 격자에 대해 사용하였다.

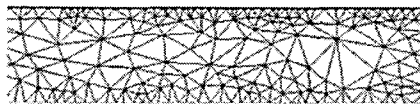


Fig. 5(a) Mesh shapes when the gap is getting smaller

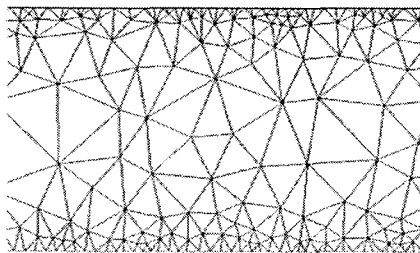


Fig. 5(b) Mesh shapes when the gap is getting larger
동적 특성을 연구함에 있어서 다소 문제점으로 지적될 수 있는 것은 정적 상태의 해석과 달리 베

어링의 하단 벽면에서 주어진 압력조건에 상응하는 속도를 위쪽 방향으로 분사하는 것으로 모사하였으며 속도는 정적 상태에서 주어진 속도의 평균값을 사용하였다. 다시 말해 현 계산의 제약성은 시간에 따라 변화될 수 있는 출구 속도를 고려하지 못하는 데 있다. 그럼에도 불구하고 본 해석 기법은 이후 이송해석과 동적 특성해석을 보다 정확하게 수행할 수 있는 예비 결과로서 그 의미가 있다. 초기 ($t=0$)에서 일정한 높이의 간극은 시간에 따라서 하중과 베어링 하단 면과의 상호작용에 의해서 평행상태로 진행하며 평행이 이루어지면 일정한 간극을 유지하게 된다. 실제 수치 해석을 수행한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 FLUENT 를 통해 진동형태가 충분히 표현이 가능함을 알 수 있다.

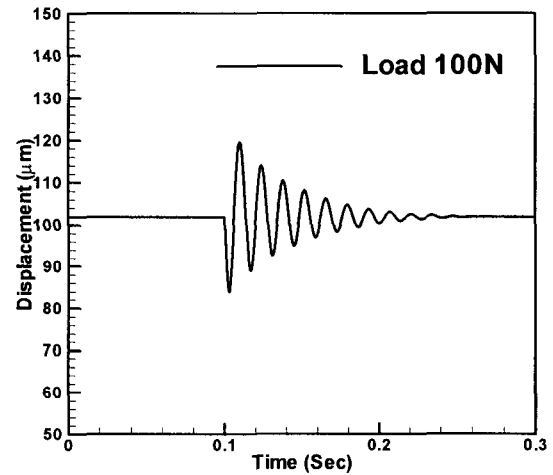


Fig. 6(a) Predicted displacement and force for 100N

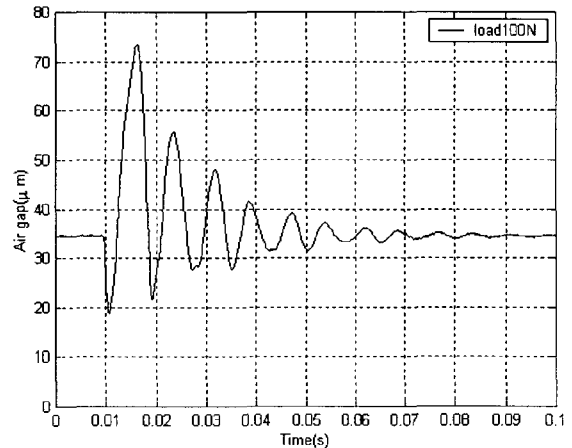


Fig. 6(b) Experimental displacement and force for 100N

하지만 실험과의 비교를 통한 결과 정성적으로는 아주 비슷한 결과를 나타내지만 정량적으로는 약

간의 오차가 있음을 알 수 있다.

3.3 이송되는 다공질 공기 베어링의 거동 해석

앞에서도 언급했듯이 실제 현장에서 요구되는 다공질 공기 베어링의 해석은 운전 중 이송 되었을 때의 거동 해석이다. 공기 베어링은 내부로부터 공기를 아래 벽면으로 분사하여 부양을 하고 이 상태에서 요구하는 작업을 수행하게 된다. 하지만 FLUENT 의 움직이는 상태에서의 해석의 제한 때문에 본 연구에서는 동강성 해석과 마찬가지로 아래 벽면에서 공기를 분사시켜 에어 베어링을 부양시키는 방법으로 경계조건을 처리하였다. 격자는 Fig. 7 과 같이 2 차원 삼각격자를 사용하였고 이송되는 공기 베어링의 평균 속도는 0.7m/s 의 값을 사용하였다.

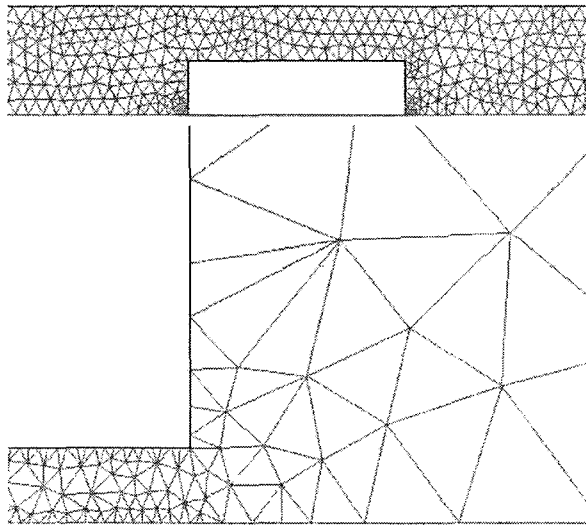


Fig. 7 Grid system for moving air bearing

공기 베어링은 부양 후 일정 시간이 지나면 평형 상태에 머물게 되고 FLUENT UDF 코드를 사용하여 외력을 가하게 된다. FLUENT 의 결과 데이터로부터 공기 베어링과 바닥 사이의 간극의 변화와 바닥 면에 작용하는 힘을 계산하였다.

Fig. 8 은 이송되는 공기 베어링과 변화하는 격자의 모습이다. 즉 Fig. 8(a)과 8(b)는 각각 공기 베어링의 이송이 시작되는 지점과 일정 시간 후 이송 된 상태에서의 모습이다.

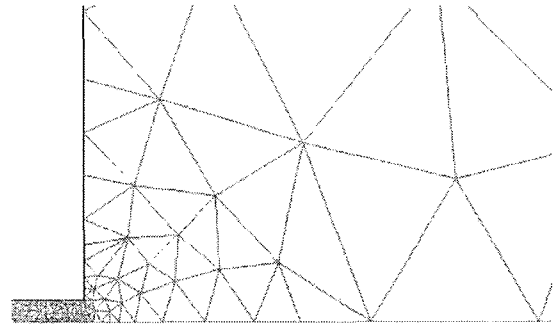


Fig. 8(a) The grid of the moving air bearing (t=0)

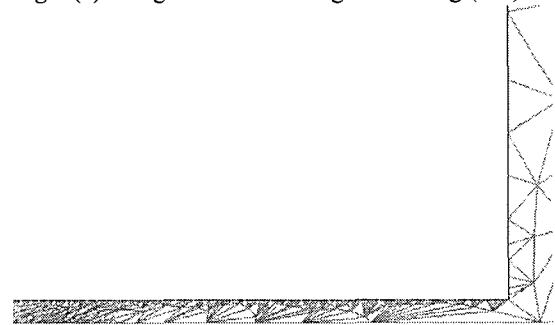


Fig. 8(b) The grid of the moving air bearing (t=0.3)

4. 결론

본 연구로 인해 얻어진 결론은 다음과 같다. 우선 수치 해석과 실험을 비교하여 다공질 공기 베어링의 정강성의 하중에 따른 비선형 특성을 확인하였고 수치 해석 결과와 실험 결과는 매우 잘 일치하였다. 특히 모든 수치 해석에서 새로운 조도 효과 모델을 개발 적용하여 더욱 실험과 일치하는 결과를 도출해 낼 수 있었다. 또한 동적 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며 공기 베어링에 작용하는 힘의 감쇠특성을 확인하였다. 그리고 실제 현장에서 요구되는 공기 베어링의 이송시의 거동 특성에 대해서도 해석을 수행하였다.

후 기

본 연구는 삼성전자(주)의 산학협동과제에 의해 진행되었습니다.

참고문헌

- (1) Ansys.inc ICEM-CFD 5.1 user's manual.
- (2) Fluent.inc FLUENT 6.2 user's manual.
- (3) Mala, G.M. and Li, D., 1999, "Low Characteristics of Water in Microtubes", *Int. J. of Heat Fluid Flow*, Vol. 20, pp.142~148
- (4) Kleinstreuer, C. and Koo, J., 2004, "Computational Analysis of Wall Roughness Effects for Liquid Flow in Micro-Conduits", *ASME Journal of Fluid Engineering*, Vol. 126, pp.1~9

- (5) Croce, G. and D'Agaro, P., 2005, "Numerical Simulation of Roughness Effect on Microchannel Heat Transfer and Pressure Drop in Laminar Flow", *J. of Physics, B:Appl. Phys.*, Vol. 38, pp.1518~1530