

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.3.235>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5234(Online)

## 공기베어링의 노즐 형상 변화에 따른 출구면 근방의 유동구조에 대한 수치해석

박병호<sup>\*,\*\*</sup>, 한용운<sup>\*†</sup>, 박상신<sup>\*</sup>

\* 영남대학교 기계공학과, \*\* 대구공업대학교

### Numerical Investigation of Flow Structures near Various Nozzle Exit Geometries of the Air Bearing

Byung Ho Park<sup>\*,\*\*</sup>, Yong Oun Han<sup>\*†</sup> and Sang-Shin Park<sup>\*</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,

\*\* Daegu Technical Univ.

(Received October 12, 2013 ; Revised December 27, 2013 ; Accepted January 3, 2014)

**Key Words:** Nozzle(노즐), CFD,(전산유체역학), Air Bearing, Pressure Distribution

**초록:** 공기 베어링의 성능개선을 위하여, 일반적인 급기공 형상(drill shape), 곡면 급기공 형상(matched cube shape) 및 45°모따기 노즐 출구부(trimmed shape)를 가지는 3가지 형태의 노즐형상에서 급기압을 변화시켰을 때, 샤프트면 출구압력 특성을 전산유체역학 상용코드를 이용하여 분석하였다. 샤프트면 에서 압력 분포는 노즐 중심부에서 정체점 유동의 영향으로 최대압이 발생하며, 노즐 출구부와 샤프트면 사이의 압력분포는 미세 간극의 영향으로 와류가 형성되어 반경방향으로 국부적인 압력상승 현상이 발생한 후 음압영역이 발생하는 것이 관찰되었다. 또한 이러한 현상은 일반적인 형태의 노즐에서 급기압력비 6.92이상인 경우는 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 급기공 노즐 형상을 matched cubic 곡면으로 변화시켜 샤프트면에서 얻어진 압력 분포는 기존의 노즐과 비교한 결과 순간적인 상승압 구간이 모든 경우에 대하여 존재하였으며 급기압력비 10근처까지 음압구간이 나타나는 것으로 관찰되었다. 또한, 노즐 출구부를 모따기로 변형시켰을 때, 샤프트면에서 최대압력의 영향권이 반경 방향으로 확대되었고 음압영역은 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 결과적으로, 급기공 내부의 형상변화보다는 노즐 출구면 외부의 변형이 성능개선에 유리한 것으로 관찰된다.

**Abstract:** To investigate pressure distributions on the shaft surface of the air bearing, the commercial CFD software was employed to study three different nozzle geometries to improve the nozzle performance: general drill-shaped, matched cube-shaped and trimmed exit nozzles. Under the influence of stagnation point, the maximum pressure was observed at the center of shaft surface for all cases. Owing to the blocking effect of a fine gap between the shaft surface and the nozzle exit, the drill-shaped nozzle has the rapid local pressure increase near the nozzle exit corner, generating the ring vortex in the radial direction within pressure ratio of 6.92, and its pressure becomes negative in a certain range of downstream. In comparison, the contoured nozzle showed a local pressure increase in the measured range of pressure ratios, but a negative pressure appeared within the pressure ratio of about 10. The trimmed nozzle was seemed to extend the high pressure zone near the stagnation point in the radial direction substantially, and no negative pressure was appeared in the whole range. Based on these observations, it is found that trimming nozzle exit becomes more effective for improving the performance than modifying the nozzle inside contour.

- 기호설명 -

R : 노즐반경

d : 노즐 출구부와 샤프트면 사이의 간격

L : 노즐 중심 길이

$P_r$  : 노즐 입구압과 관로 출구압의 비

† Corresponding Author, yohan@ynu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

y : 중심축에서 정의된 관로거리

## 1. 서론

1980년대까지 공작기계의 주된 운동요소로는 주로 볼 베어링과 같은 구름 운동요소를 주로 사용하였다. 그러나 구름베어링 등은 회전정밀도를 높이는 데 한계가 있어 고속의 회전기계류에서의 적용에 문제점이 발생하고 이러한 구름베어링을 대체하기 위해 유체 베어링의 연구가 활발히 진행되어 왔다.

이러한 유체베어링은 기름이나 물 등 비압축성 유체를 사용한 비압축성 유체 베어링과 공기와 같은 압축성 유체를 사용한 압축성 유체베어링으로 나누어지는데, 압축성 유체베어링은 유체 베어링에 비해 밀도가 극히 낮아(약 1/1000) 열의 발생이 적으며, 유체의 압축성에 의해 평균화 효과로 운전 정밀도가 높아 그 활용 범위가 확대되고 있다.

압축성 베어링의 대표적인 공기베어링의 경우 하드디스크<sup>(1,2)</sup>나 마그네틱 헤드와 테이프 등<sup>(3)</sup>에 사용되는 동압형 공기 베어링과 고 하중에 회전정밀도가 높은 정압형 공기 베어링으로 나누어 질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 정압형 공기 베어링에서 점급기공 형상 및 노즐 출구부의 형상을 변화시켜 그 형상 변화에 따른 영향을 공기역학적으로 분석해 보았다.

공기베어링의 점급기공은 유동이 일정한 크기의 관로(channel)를 통과하는 노즐(nozzle)의 특성 가진다 할 수 있다. 이러한 형태의 유로를 지나는 유동은 노즐의 단면적 변화, 마찰 및 열전달 등의 영향으로 인해 유동의 상태량이 변화한다. 공기베어링의 유동현상 즉 압축성 유동의 경우 유로 상하류의 압력비에 의해 유동에서 초크(chock)현상이 발생하기도 하며, 비선형적인 물리현상이 발생하기도 한다.<sup>(4)</sup> 이에 대한 유체역학적 연구는 활발히 이루어졌으나 대부분이 개방형 유로에서의 비압축성 유동에 대하여 연구가 집중되었다.<sup>(5)</sup>

본 연구에는 이러한 공기베어링의 공기역학 특성을 파악하기 위하여 3차원 형상을 2차원 축대칭 형상으로 간략화 하였고, 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 급기압변화와 유로변화에 따른 유동특성을 전산 수치 해석하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석 지배방정식

본 연구에서는 단일 급기공 정압식 공기베어링의 유동현상의 분석을 위해 2차원 축대칭 연속방

정식과 2차원 축대칭 Navier-Stokes 방정식 식 (1)을 통하여 전산 수치 해석을 진행하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \bar{\tau} \right) + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (1)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \bar{u} I \right]$$

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T} \quad (2)$$

압축성 유동에 대하여 고려하기 위해 이상기체의 밀도변화를 식 (2)를 통하여 적용하였으며, 표준형  $k-\epsilon$  난류모델, 식 (3)을 적용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3)$$

여기서 사용된 표준  $k-\epsilon$  난류모델의 상수 값은 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

### 2.2 해석 모델 정의

단일 급기공 정압식 공기베어링의 유동현상의 분석을 위해 3차원 형상을 2차원 축대칭 모형으로 간략화 하여, 형상 변화에 의해 발생하는 공기역학적 특징의 변화에 중점을 두어 수치해석을 진행하였다.

또한 노즐출구부(nozzle exit)에서 미세한 간극을 가지는 샤프트면(shaft surface)을 두었으며, 곡선형태의 샤프트면을 평면으로 가정하여 이때 발생하는 유동의 특성을 파악하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 형상들에 대해 정의한 것이다. 서로 다른 형상에 대하여 상호 비교

분석을 위해 노즐의 반경(R)은 0.15mm, 노즐의 길이(L)는 1mm로 동일하였다. 또한 노즐출구와 샤프트면과의 간극(d)을 20 $\mu$ m로 정의하였으며, 이때의 급기공(supply hole)의 직경을 노즐반경의 33배(33R)로 정의하였다. 또한 샤프트면의 길이는 노즐 반경의 50배(50R)로 정의하여 출구의 영향을 최소화 하도록 하였다.

이러한 2차원 축대칭 형상을 다음과 3가지의 경우로 나누어 그 명칭을 정의하였다. 기 상용화되어 있는 공기베어링의 규격을 활용하여 급기공과 노즐 입구부 사이의 각도가 118°이고, 노즐 출구부가 직각인 경우를 선택하여 drill shape(Fig. 1)이라 정의하였으며, 급기공의 형상을 matched cubic equation에 따라 변형시키고, 노즐 출구부가 직각인 경우를 matched cube shape(Fig. 1 (middle)), drill shape 노즐

shape(Fig. 1 (bottom))이라 각각, 정의하였다.

또한 matched cube shape은 2개의 3차 다항식이 하나의 점에서 연결되어 완만한 곡선을 이루도록 하였으며 본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 변형 구간의 중심점을 matching 점으로 선택하였다.<sup>(6)</sup>

2.3 경계조건 및 격자

본 연구에 사용된 경계조건은 급기공의 입구부분에 pressure inlet, 출구부분 pressure outlet 조건을 적용하였으면 모든 벽면은 non-slip wall 조건을 적용하였다. 작동유체는 이상기체 방정식을 따르는 공기를 사용하였다.

수치해석은 밀도의 변화를 고려하기 위해 절대압(absolute pressure)을 기준으로 수치해석을 수행하였으며 유동 출구부에서의 조건은 대기압(1ATM, 1.01325bar)으로 모든 경우에 동일하게 적용하였다.

Table 1 Pressure ratios between inlet and outlet

Pressure inlet(bar)	Pressure outlet(bar)	pressure ratio ( $P_r$ )
3.01325	1.0325	2.97
4.01325	1.0325	3.96
5.01325	1.0325	4.94
6.01325	1.0325	5.93
7.01325	1.0325	6.92
8.01325	1.0325	7.90
9.01325	1.0325	8.89
10.01325	1.0325	9.88
11.01325	1.0325	10.86
12.01325	1.0325	11.85
13.01325	1.0325	12.84
14.01325	1.0325	13.83
15.01325	1.0325	14.81

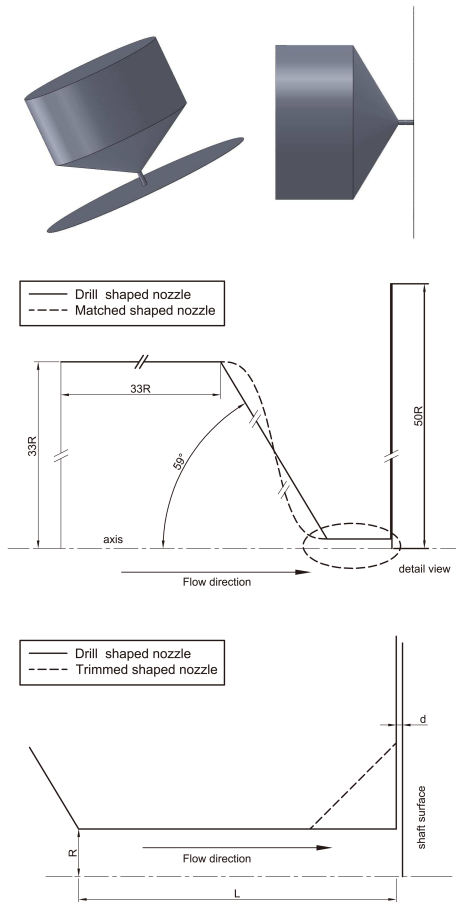


Fig. 1 Schematic diagram of the drill-shaped nozzle on 3D view (top), the drill-shaped nozzle with the matched cuber-shaped nozzle (middle), and the drill-shaped nozzle with the trimmed shaped (bottom), respectively

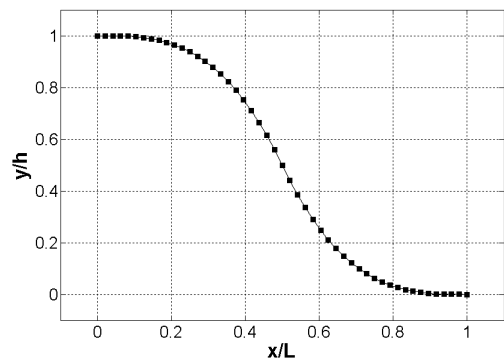


Fig. 2 Contour of matched cube shaped nozzle

출구 일부를 45°각도로 모따기 한 형상을 trimmed

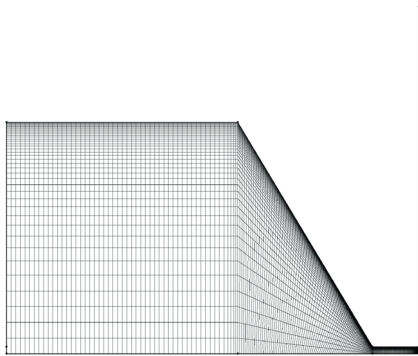


Fig. 3 Computational grid system

또한 압력 변화에 따른 유동의 특성을 파악하기 위해 입구압을 3.01325bar에서 15.01325bar까지 1bar 단위로 증가시켜, 입출구 압력비가 2.97에서 14.81 사이일 때의 결과를 비교 관찰하였다(Table 1).

수치해석에 있어 모든 격자계는 정규격자를 사용하였으며, 이때의 격자의 품질은 벽면 Y+ (dimensionless wall distance)가 모든 경우에 3이하가 되도록 격자를 구성하였다(Fig. 3).

### 3. 결과분석

#### 3.1 Drill shape 결과분석

Drill shape인 경우의 2차원 축대칭 단면에서의 압력 분포를 Fig. 4에 도시해 두었다. 노즐 출구부에서의 유동은 샤프트면과 미세한 간극에 의해 복잡한 형태의 압력변화가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 입출구 압력비(pressure ration)가 6.92인 경우의 결과 값을 나타낸 것인데, 확대된 그림에 의하면 샤프트면 초기에 매우 복잡한 압력변화가 감지되며 이 경우의 샤프트면에서의 압력 분포도를 Fig. 5와 같이 축대칭으로 재작성하였다.

샤프트면에서의 압력분포는 정체점의 영향으로 노즐 중심축( $y=0$ )에서의 높은 압력집중이 발생하며, 노즐 출구(nozzle exit)와 샤프트면의 미세한 간극의 영향으로 노즐 출구부에서 국부적인 압력 상승이 발생한 후 점차 감소하는 현상이 나타난다.

이러한 압력 분포의 정량적인 분석을 위하여 샤프트 면에서의 압력 분포를 출구압( $P_{out}$ )과 출구까지의 거리( $50R$ )에 통하여 무차원 하여 Fig. 6,7에 각각, 제시하였다.

정체점 이후 발생하는 국부적인 압력 상승현상이 발생하였을 때의 최대압력 값을 2차 최대압(2nd maximum pressure)이라 명칭하였다.

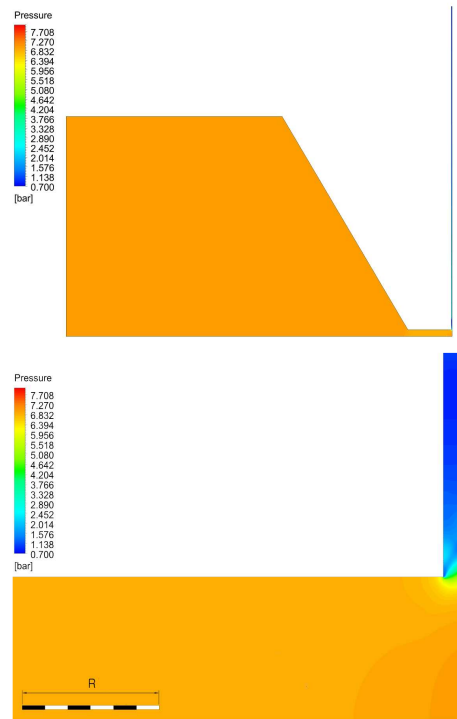


Fig. 4 Pressure distribution of the drill shaped nozzle on one axi-symmetric plane at pressure ratio of 6.92; whole view (top) and zoomed view near to channel exit (bottom)

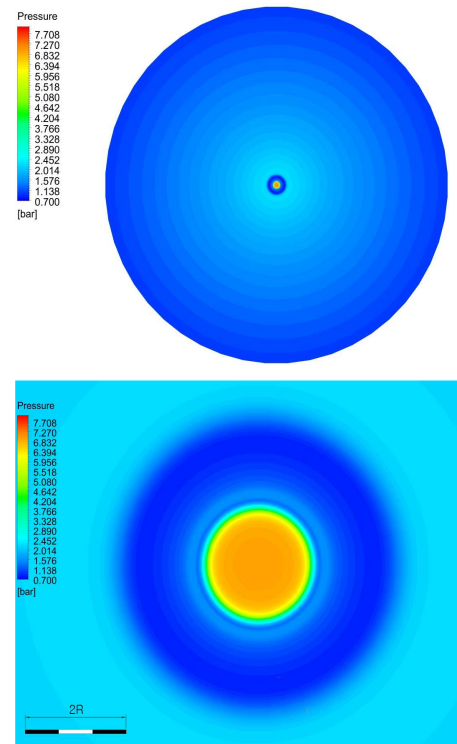


Fig. 5 Pressure distribution of the drill shaped nozzle on the shaft surface at pressure ratio of 6.92; whole view (top) and zoomed view near to channel exit (bottom)

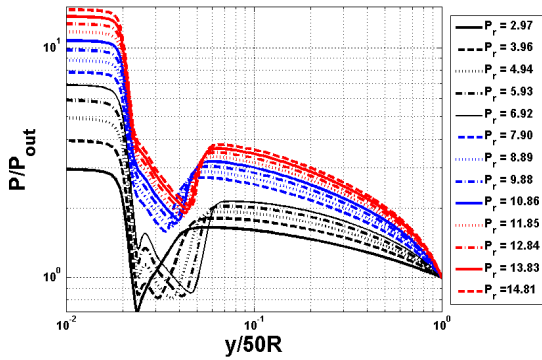


Fig. 6 Non-dimensional pressure distribution in log scale along the shaft surface of the drill shaped nozzle

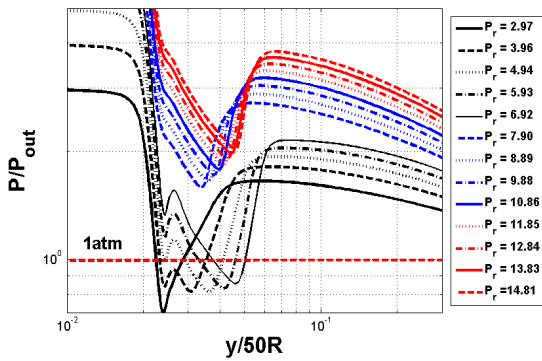


Fig. 7 Local view of Non-dimensional log scale pressure distribution along the shaft surface at drill shape

이러한 국부적인 압력상승 현상은 공급 압력비가 6.92 이하인 영역에서 발생하였으며, 이 영역에서 공급압력비가 증가함에 따라 2차 최대압의 크기가 커지고, 또한 이러한 국부적인 압력상승 현상으로 인하여 2차 최대압 이후 압력 강하가 관찰 되었으며, 이러한 압력 강하는 압력비가 증가함에 따라 더욱 강하게 나타나는 것을 알 수 있다.

이러한 압력 강하에 의해 발생하는 음압영역 (1ATM 이하)은 압력비가 커짐에 따라 점차 후방으로 이동하며, 그 최소값의 크기도 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다. (Fig. 6, 7, Table 2)

이러한 국부적인 압력상승 현상은 Fig. 8에 제시된 속도장에서 볼 수 있듯이 노즐 출구부의 직경 대비 샤프트 면과 노즐 출구부 사이의 간극이 미소하여 단면적의 급속한 감소가 발생하여 유속이 증가하게 되는데, 이때 유동이 아음속에서 음속으로 천이되게 되고, 이로 인하여 발생하는 현상이라 볼 수 있다.

Table 2 Non-dimensional 2nd maximum pressure points along the shaft surface of the drill shaped nozzle

Pressure ratio between inlet and outlet	Non-dimensional distance from axis	Non-dimensional 2nd maximum pressure
3.96	0.02639	0.936
4.94	0.02639	1.137
5.93	0.02639	1.134
6.92	0.02639	1.555



Fig. 8 Velocity contour near the nozzle exit of the drill shaped at pressure ratio of 6.92

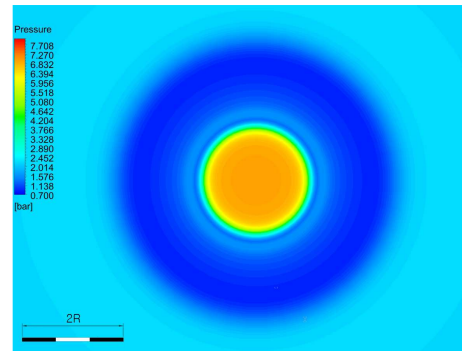


Fig. 9 Pressure distribution of the matched cube shaped nozzle on the shaft surface at pressure ratio of 6.92

### 3.2 Matched cube shape 결과분석

Matched cube shape에 대하여 분석하기 위해 drill shape과 동일한 방법으로 샤프트면에서의 압력 분포를 3차원화 하여 Fig. 9에 도시하였다. 또한 정량적인 분석을 위하여 샤프트 면에서의 압력 분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 각각, 도시해 두었고, 이때 발생한 2차 최대압의 크기와 위치를 Table 3에 제시하였다.

matched cube shape의 경우 높은 압력비(6.92 이상)에서도 국부적인 압력상승 현상이 발생하였고,

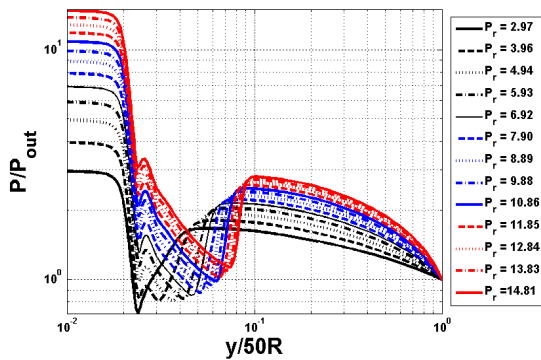


Fig. 10 Non-dimensional pressure distribution along the shaft surface at matched cube shape

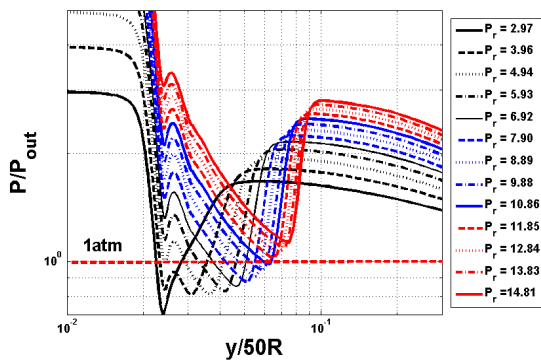


Fig. 11 Local view of non-dimensional pressure distributions along the shaft surface of the matched cube shaped nozzle

국부적인 압력상승현상 이후 발생하는 압력 강하 현상 또한 지속적으로 관찰 되었다. 이러한 압력 강하현상은 압력비 11.85 이상인 경우에 음압의 영역이 발생하지 않는다는 것이 관찰되었다.(Fig. 10,11)

3.3 Trimmed shape 결과분석

Trimmed shape의 결과를 분석하기 위해 압력 분포를 3차원화 하여 Fig. 12에 도시해 두었다. 또한 샤프트 면에서의 압력 분포를 Fig. 13, 14에 도시해 두었다. 또한 drill shape의 압력과 정성적인 비교를 위하여 Fig. 15에 축대칭 단면에서의 압력 분포를 각각, 도시해 두었다.

Trimmed shape의 경우 압력 재상승 현상이 발생하지 아니하였으며 이로 인한 압력강하현상도 발생하지 아니하였다. 또한 압력 강하에 의해 발생하던 음압 영역이 존재하지 아니한 것으로 나타났다. 또한 정체압에 영향부가 다른 형상에 비해 넓은 것이 관찰되었다(Fig. 12~15).

Table 3 Non-dimensional 2nd maximum pressure points along the shaft surface of the matched cube shaped nozzle

Pressure ratio between inlet and outlet	Non-dimensional distance from axis	Non-dimensional 2nd maximum pressure
3.96	0.02613	0.9351
4.94	0.02648	1.136
5.93	0.02548	1.344
6.92	0.02648	1.557
7.90	0.02613	1.767
8.89	0.02613	1.985
9.88	0.02613	2.203
10.86	0.02613	2.425
11.85	0.02613	2.649
12.84	0.02581	2.882
13.83	0.02581	3.115
14.81	0.02581	3.345

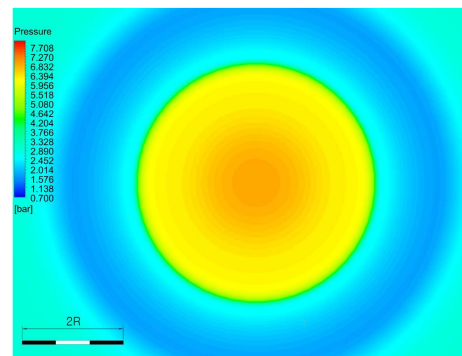


Fig. 12 The pressure distribution of matched cube shaped nozzle on the shaft surface at pressure ratio of 6.92

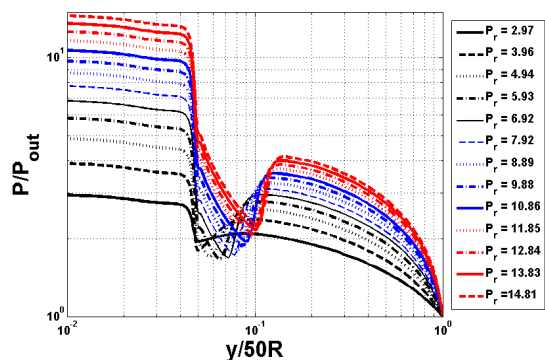


Fig. 13 Non-dimensional pressure distribution along the shaft surface at trimmed shape

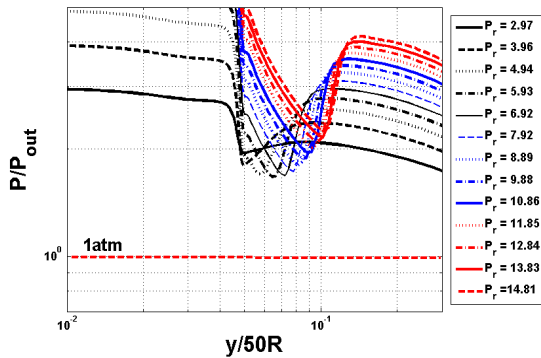


Fig. 14 Local view of non-dimensional pressure distributions along the shaft surface of the trimmed nozzle

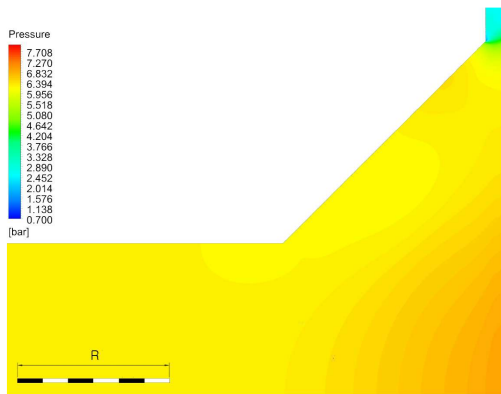


Fig. 15 Pressure distribution of the matched cube shaped nozzle on one axi-symmetric plane at the pressure ratio of 6.92

### 3.4 형상 변화에 따른 결과 비교 분석

노즐 입구인 급기공의 기하학적 영향을 보기위 해서 drill shape과 matched cube shape 형상들을 비교하였고, 노즐 출구부의 영향을 비교하기 위해서는 drill shape과 trimmed shape의 결과들을 각각 비교하여 관찰하였다.

앞에서 살펴본 바와 같이 drill shape의 경우 압력비 6.92 이하의 경우에서만 국부적인 압력상승 현상이 발생하고, 그 이상의 경우에는 단순히 2차 압력 최대 점들만 발생하는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 임계압력비 이하 유선과 임계압력비 이상의 경우를 비교해 볼 때 노즐출구 부근의 와류 유동 특성에서 그 원인을 찾을 수 있다(Fig. 16). 즉, 임계압력 이하에서는 노즐 출구면에서 완만한 와류가 생성되어 와류 중심점 근방에서 국부압력 상승이 이루어진 후에 재차 압력 강하가 진행된 것을 관찰하였고 임계압력 이상에서는 급기공의 고압으로 인하여 노즐 출구부

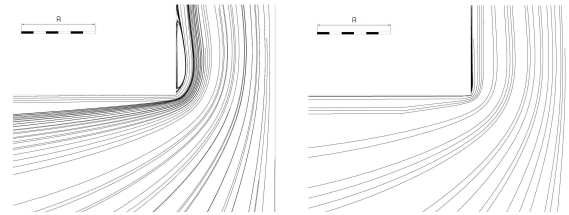


Fig. 16 Stream lines of the drill shaped nozzle at pressure ratio of 6.92 (left) and of 10.86 (right). respectively

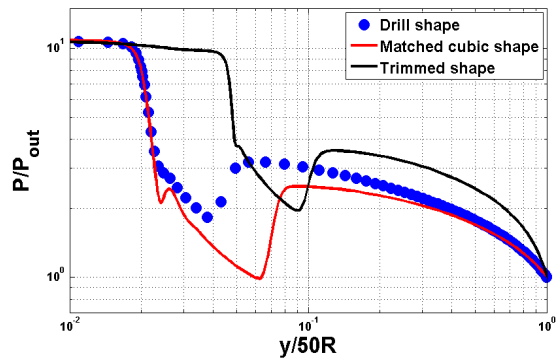
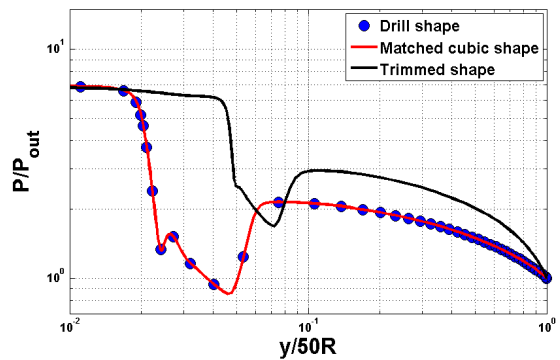


Fig. 16 Comparison results of three different nozzles at pressure ratios of 6.92(top) and of 10.86(bottom), respectively

에 와류성분이 나타나지 않았으며, 그로 인하여 임계압력비 이하에서 발생하던 국부적인 압력상승 현상이 나타나지 않았다.

한편, matched cube 형상 노즐에서는 여전히 국부압력비 상승이 존재하는데 이는 와류가 지속적으로 발생하고 있는 것으로 판단된다.

matched cube 형상 노즐의 경우 압력비가 증가함에 따라 2차 최대압의 크기가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.(Fig. 11, Table 3) 이는 drill shape의 경우와 달리 급기공의 압력이 증가하더라도 일정한 경향성을 보이며, 난류 성분 또한 이러한 일정한 경향성이 유지된다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 토대로 급기압력비가 급속하게 변화할 때 급기공 형상의 변화가 공기베

어링의 작동 안정성에 긍정적인 영향을 준다고 판단할 수 있다.

Fig. 17은 임계압력비 이하인 경우와 임계압력 이상인 경우에서의 샤프트면 압력 분포를 3가지 형상에 대해 비교 분석한 것이다. 급기공을 변화시킨 경우를 관찰하면(drill shape, matched cube shape 비교) 임계압력비 이하에서는 두 경우 미미한 변화를 보이지만 임계압력비 이상인 경우에는 오히려 drill shape의 경우가 전체적으로 압력이 상당한 크기로 유지되므로 유리한 것으로 판단된다.

노즐 출구부의 형상을 변화 시킨 trimmed shape 노즐을 다른 노즐결과들과 비교해 볼 때, 임계압력비에 상관없이 정체압의 영향권이 월등하게 확대되고 2차 최대압 크기도 세 경우 중에서 가장 큰 값으로 유지되므로 베어링 샤프트면에 가장 큰 추력을 발생시킬 것으로 판단된다. 이러한 계산 결과는 급기공의 형상 변화보다는 출구면의 형상변화가 샤프트면의 추력증가에 월등하게 효율적인 것을 말한다. 이는 공기베어링의 노즐을 제작할 때, drill을 이용하여 단일 공정으로 노즐을 제작하지만 출구면에 간단한 추가 공정을 도입하면 효율면에서 매우 우수한 결과를 얻을 수 있음을 암시한다.

#### 4. 결 론

상용 CFD 소프트웨어 FLUENT를 이용하여 단일 급기공 공기 베어링의 형상을 변화시켰고, 형상 변화에 따른 유동현상을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 샤프트면 에서 압력 분포를 비추어 보았을 때 노즐 중심축에서 정체점이 발생하고, 정체점에서 최대압을 가지며, 유동이 후류로 진행됨에 따라 압력이 감소한 후에 2차 최대압이 발생한 후에 다시 점차 감소하는 특징을 나타냈다.

(2) 기존의 drill shape 노즐은 임계압력비 이하에서 2차 압력최대압 위치 전에 국부압력 상승이 발생되는데 이는 노즐 출구 끝단에서 발생하는 와류에 의한 영향으로 판단되며 본 연구에서는 임계압력비가 6.92로 확인되었다.

(3) 급기공을 완만하게 변화시킨 matched cube

형상의 노즐은 본연구의 모든 압력비에서 국부압력증가가 나타나므로 계속해서 와류의 영향을 받게 되어 임계압력비가 존재하지 않고 유동의 경향성이 동일하게 유지되는 것으로 나타났다.

(4) Trimmed shape 노즐의 경우는 국부적인 압력 재상승이 발생하지 아니하며 또한 음압영역이 관찰되지 아니하였다. 또한, 정체압의 영향부가 더 넓어 졌으며, 이러한 현상은 샤프트면에 압력 에너지를 변환하여 추력을 증가시킨다는 측면에서 상당히 유리한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

##### (References)

- (1) Odake, T., Tanaka, K., Takeuchi, Y. and Saitoh, Y., 1987, "Dynamic Characteristics of Air Lubricated Slider Bearings for Magnetic Disk Files (Calculation by Finite Element Method," *JSME Int. J.*, Vol. 30, No. 262, pp. 638~645.
- (2) Park, N. Y. and Hwang, T. Y., 1999, "Dynamic Pressure Air Bearing Technic for the Spindle Motor of a High Speed Hard Disc Drive," *Proceedings of KIEE*, Vol. 48, No.6, pp.29~35.
- (3) Lee, K. J. and Han, D. C., 1987, "Tehoretical Investigation on the Air Film between Magnetic Head and Tape," *Journal of KSLE*, Vol. 3, No. 1, pp. 31~38.
- (4) Kubo, K., Miyazato, Y. and Matsuo, K., 2010, "Study of Choked Flows through a Convergent Nozzle," *Journal of Tehmal Science*, Vol. 19, No.3, pp. 193~197.
- (5) Kim, J. H., Kang, M. S. and Kim, H. D., "Study on the Choking Phenomenon in 2-D Channel Flow," *Proceeding of the KSME 2007 Fall Annual Meeting*, pp. 13~18.
- (6) Fang, F.-M., Chen, J.C. and Hong, Y.T., 2001, "Experimental and Analytical Evaluation of Flow in a Square-to-Square Wind Tunnel Contration," *Journal of Wind Engineering and Industrial Areaodynamics*, Vol. 89, Issue 3-4, pp. 247~262.
- (7) Sheshagiri Hebbar, K., Sridhata, K. and Patanjpe, P. A., 1969, "Performance of Conical Jet Nozzle in Terms of Discharge Coefficient," *Journal of Aeronautical Society of India*, Vol. 22, No.3, pp. 3~9.