

베르누이 부상유동의 이론해석 및 수치해석 연구

남종순* · 김규완* · 김진현* · 김희동**

* 안동대학교 기계공학과

Theoretical and Computational Analyses of Bernoulli Levitation Flows

Jong Soon Nam*, Gyu Wan Kim*, Jin Hyeon Kim* and Heuy Dong Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received November 19, 2012 ; Revised April 5, 2013 ; Accepted April 10, 2013)

Key Words: Bernoulli Principle(베르누이 원리), Gas Levitation(기체 부상), Compressible Flow(압축성 유동), Non-Contact Transportation(비접촉 이송), Flow Choking(유동 초킹)

초록: 공압 부상은 베르누이 원리에 기초한다. 그러나 공압 부상 방법은 제품의 원가 상승의 요인이 되는 대량의 유량을 소모하는 것으로 알려져 있다. 이 논문에서는 베르누이 부상 유동의 통찰력을 얻기 위해 수치 해석 연구를 수행하였다. 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식과 SST k- ω 난류모델에 유한 체적법을 적용하여 계산하였다. 기체 유량, 공정 제품의 직경 그리고 원형실린더와 공정 제품사이의 간극을 다양하게 변화하여 공정 제품 주위의 유동 특성을 조사하였다. 그 결과 부상력을 위한 최적의 간극과 공급 기체 유량이 증가하면 큰 부상력이 발생한다는 것을 알았다.

Abstract: Pneumatic levitation is based upon Bernoulli's principle. However, this method is known to require a large gas flow rate that can lead to an increase in the cost of products. In this case, the gas flow rate should be increased, and the compressible effects of the gas may be of practical importance. In the present study, a computational fluid dynamics method has been used to obtain insights into Bernoulli levitation flows. Three-dimensional compressible Navier-Stokes equations in combination with the SST k- ω turbulence model were solved using a fully implicit finite volume scheme. The gas flow rate, workpiece diameter, and clearance gap between the workpiece and the circular cylinder were varied to investigate the flow characteristics inside. It is known that there is an optimal clearance gap for the lifting force and that increasing the supply gas flow rate results in a larger lifting force.

- 기호설명 -

p : 압력(Pa)

V : 속도(m/s),

ρ : 밀도(kg/m³)

g : 중력가속도(m/s²)

d : 노즐 직경(mm)

H : 노즐 높이(mm)

D : 공정 제품의 직경(mm)

r : 공정 제품의 반경(mm)

h : 이송장치와 공정 제품 사이의 간극(mm)

h_v : 베나 콘트랙타의 두께(mm)

Q : 체적유량(m³/s)

\dot{m} : 유량(kg/s)

F_l : 부상력(N)

δ : 방위각(°)

f : 마찰계수

γ : 비열비

첨자

a : 대기조건

1. 서론

최근 비접촉 처리 방법은 짐을 싣고 내리는 반복 과정 중에 자주 사용되는데, 웨이퍼 같은 반

† Corresponding Author, kimhd@andong.ac.kr

도체 생산 공정에서 많은 주목을 받고 있다. 기존의 접촉 처리 방법은 공정 제품(Workpiece)과 접촉이 이루어지기 때문에 제품의 손상 및 오염 등 생산성이나 효율성에 많은 문제가 발생하게 되어 비접촉 처리 방법의 사용이 높아지고 있다. 비접촉 처리 방법으로는 자석의 자기장을 이용한 방식, 진공을 사용하는 진공 흡착 방식, 정전기력에 의해 공정 제품을 운반하는 정전기 방식, 그리고 공압을 이용한 부상 등이 대표적이다. 그 중에서 공압을 이용한 부상 방법은 어떤 종류의 재료에도 쉽게 적용할 수 있고, 사용이 자유롭다는 장점을 가지고 있다. 또한 이러한 방법은 공정 제품과 접촉하지 않기 때문에 제품 표면에 손상이나 자국이 없고 오염되지 않으며 다양한 제품의 운반을 가능하게 하여 생산성이나 효율성에 막대한 효과를 볼 수 있기 때문에 현재 많은 연구가 되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

공압 부상은 베르누이 원리(Bernoulli principle)에 기반을 두고 있다. 베르누이 원리란 정상(Steady), 비점성 유동(Non-viscous flow), 비압축성(Incompressibility)인 이상적인 기체가 유선(Streamline)을 따라 흐르는 경우에 대해 속력과 압력, 높이의 관계에 대한 법칙,⁽⁵⁻⁷⁾

$$p + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gz = constant \quad (1)$$

으로 정의 한다. 위 식에서 p 는 압력, V 는 기체 속도, ρ 는 밀도, z 는 높이, g 는 중력 가속도를 나타낸다. 기체의 속력이 증가하면 기체 내부의 압력이 낮아지고, 반대로 속력이 감소하면 기체 내부의 압력이 높아진다. 이러한 원리를 이용한 전형적인 공압 부상 방법을 베르누이 부상이라고 한다.

Figure 1은 베르누이 부상의 개략도이다. 공정 제품의 상측에 있는 노즐로부터 공정 제품이 있는 하측으로 기체를 유입시킨다. 이때 기체는 공정 제품 표면에서 유속이 증가함으로 인해 압력이 내려가게 되고, 이때 공정 제품 밑면에서는 상대적으로 압력이 높아짐으로서 부상력(Levitation force)이 발생하여 공정 제품이 부상하게 된다. 하지만 최근 비접촉 장치가 사용되어지는 반도체 생산 공정의 웨이퍼는 크기가 점점 증가하는 추세이다. 이에 따라 웨이퍼를 들어 운반하기 위해서는 큰 가스 유량과 힘이 필요하고, 유입되는 기체가 웨이퍼를 지나가는

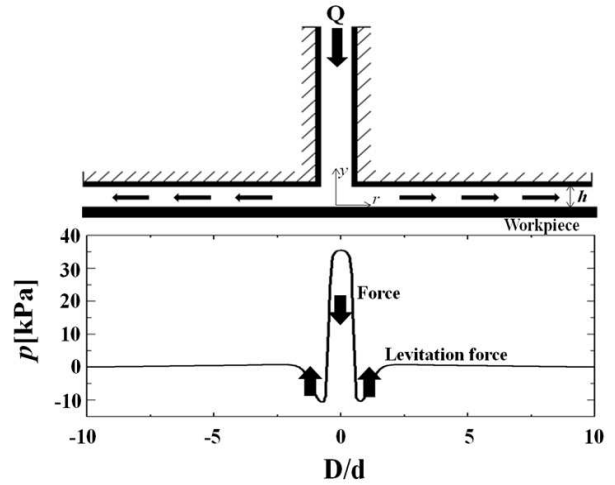


Fig. 1 Schematic diagram of Bernoulli levitation

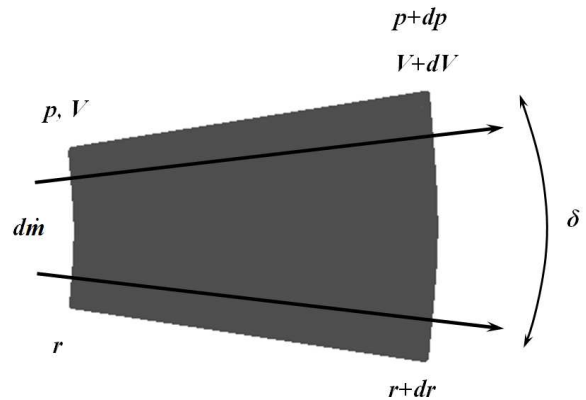


Fig. 2 Theoretical model

동안 지연시간이 생겨 초기의 기체 압력이 일정하지 않아 불안정해져 공정 제품을 이송하기 곤란하게 되는 문제점이 있다. 이러한 경우 공압을 효과적으로 사용하는 것이 중요하다.⁽⁸⁻¹¹⁾

이 연구에서는 베르누이 부상에 대한 이해를 높이기 위해 이론해석 모델을 설계하여 공정 제품에 작용하는 압력에 대해 이론해석을 수행하였다. 또한 수치해석을 병행하여 그 결과를 비교하였다. 수치해석은 3차원 형상의 모델을 사용하여 공정 제품과 이송장치를 형상화하였으며 공정 제품 주위의 유동 특성을 조사하기 위해 유량, 공정 제품과 원형 실린더 사이의 간극을 다양하게 변화시켰다. 또한, 각각의 결과에 대해 부상력을 계산하여 분석하였다.

2. 이론해석

이 연구에서는 문헌^(5-7,12)을 참고하여 이론해석을 수행하여 후술하는 바와 같은 결과를 얻었다.

Figure 2는 이론해석에 사용된 모델로, r 에서 $r+dr$ 은 반경의 크기, δ 는 방위각의 크기, 그리고 모든 부분에서 일정한 두 평판 사이의 간극은 h 이고, 유량 \dot{m} 은 kg/s로 왼쪽에서 오른쪽으로 일정하게 통과한다. 그리고 입구에서의 속도를 V , 압력을 p 라 하고, 출구에서의 속도와 압력을 $V+dV$, $p+dp$ 이라고 정의하였다.

이때, 이론해석을 통해 공정 제품에서 작용하는 압력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$dp = \rho V^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{f}{4h} \right) dr \quad (2)$$

$$dp = \frac{\rho_a V^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{f}{4h} \right) \left(\frac{p}{p_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} dr}{\left[1 - \left(\frac{\rho_a V^2}{\gamma P_a} \right) \left(\frac{p}{p_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]} \quad (3)$$

위 식은 적용된 모델에 작용하는 두 개의 힘(하나는 압력변화에 의한 힘, 다른 하나는 벽 마찰에 의한 힘)을 고려하여 운동량 변화와 비교하여 나타낸 것으로 밀도가 일정할 때(Incompressible)와 밀도가 압력에 따라 달라질 때(Compressible)를 각각 계산하였다. 이때, 속도 V 는 원통형 구조와 질량보존에 의해 속도변화 dV 와 dr 에 관련하여 계산할 수 있다.

$$\frac{dV}{dr} = - \frac{V}{r} \quad (4)$$

또한, 마찰계수(Friction factor, f)는 Reynolds Number의 영향을 받는다. 만약, Reynolds Number가 정해져 있고, 상대 거칠기를 안다면, Moody 선도를 읽어 구할 수 있다. 또한, 모든 난류영역에서 유효한 관 유동에서의 압력강하 정보를 경험적으로 수식화한 다음 방정식을 이용하여 구할 수 있다.^(6,7)

$$\frac{1}{f} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7 D_h} + \frac{2.51}{Re_{D_h} \sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

식 (3)에서 ρ_a 와 p_a 는 주위의 밀도와 압력을 나타내는데 각각 1.225 kg/m^3 과 101325 Pa 로 적용하였고, 비열비인 γ 는 1.4로 설정하였다.

이론해석은 동일한 간극 $h=0.3 \text{ mm}$ 에서 유량을 $10 \sim 50 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 변화 시켜 계산을 수행하였다.

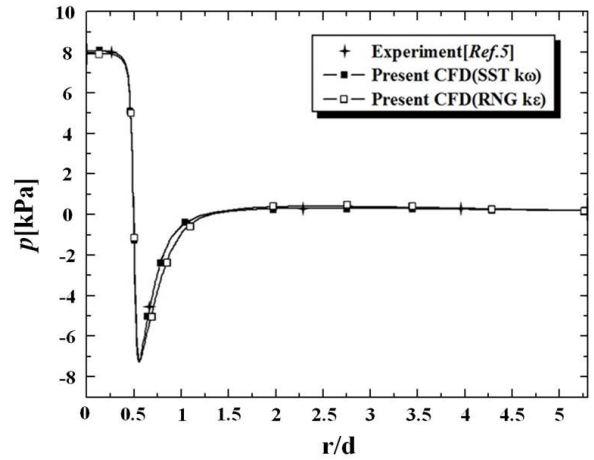
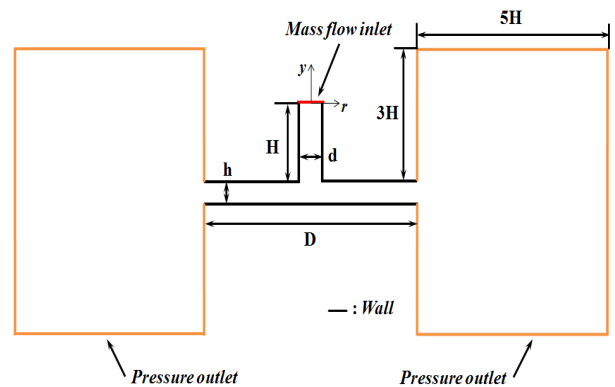
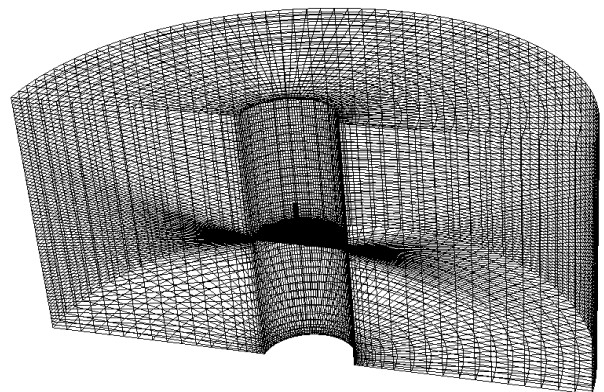


Fig. 3 Comparison of computed static pressure distributions with experiment



(a)



(b)

Fig. 4 Computational domain and grid system

이때, 계산은 노즐 입구 반경에서부터 시작하였고, 각 지역에서 속도와 Reynolds Number, 그리고 마찰계수를 계산하여 미분방정식의 해를 구하는 Runge-Kutta 법을 적용하여 압력을 계산하여 수치

해석 결과와 비교하였다.

3. 수치해석 방법

이 연구에서는 이론해석과 함께 베르누이 부상의 유동 특성을 모사하기 위하여 3차원, 대칭, 압축성, N-S 방정식을 적용한 수치해석을 수행하였다. 수치 계산은 상용코드인 Fluent Ver. 14를 사용하였으며, Coupled Implicit 방법으로, 수치적 안정성을 위해 이미 여러 문헌에 적용된 AUSM-DV와 2nd Order Up-Wind Scheme을 적용하여 대류항을 계산하였다. 수치모사의 타당성을 위해 크기는 다르지만 동일한 형상의 실험적 연구결과⁽⁶⁾에, 일반적으로 유동 현상을 잘 예측한다고 알려진 RNG- $k\epsilon$ 과 SST- $k\omega$ 난류 모델을 적용하여 예측한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이때, 두 난류 모델 모두 실험결과를 잘 예측하였다. 그 중 Menter⁽¹³⁾가 제안한 SST- $k\omega$ 난류 모델을 적용하여 연구를 수행하였다.

Figure 4(a)는 이 연구에 적용된 도메인의 상세 형상과 경계조건으로 대칭면을 기준으로 반호 형상으로 계산을 수행하였고, 적용된 경계조건은 입구에서 Mass Flow Inlet, 출구에서 Pressure Outlet, 그리고 벽면은 단열, No-Slip 조건을 각각 적용하였고, (b)는 수치계산에 사용된 정렬 격자 계로 경계층이 발달하는 벽면부분, 유동이 유입되는 입구노즐부분, 그리고 이송장치와 공정 제품을 형상화한 부분에 격자를 집중 시켰으며, Fig. 5의 격자 의존성 연구결과, 사용된 총 격자 수는 208,000개 이었다. 또한 연구에 적용된 모델의 형상은 문헌⁽⁶⁾을 참고하였으나, 본 논문에서는 소형 이송장치의 유동 특성을 알아보기 위하여 형상을 축소하여 수치해석을 수행하였다.

Table 1에는 본 연구에 적용된 여러 변수 및 조건을 정리하였다. Case a는 입구 노즐의 직경 $d=2$ mm로, 노즐길이 $H=10\times d$ 로, 원형 실린더의 직경 $D=40$ mm로, 유량 $Q=23.6\times 10^{-5}$ m³/s로 항상 고정 하여 계산을 수행하였고, 원형 실린더와 공

Table 1 Numerical conditions used in the present

Case	d[mm]	H[mm]	D[mm]	h[mm]	Q[$\times 10^{-5}$ m ³ /s]
a	2	10×d	40	0.2 ~ 0.8	23.6
b				0.3	

정 제품 사이의 간극 $h=0.2\sim 0.8$ mm까지 변화시켰다. 그리고 Case b는 $h=0.3$ mm로 고정하고 유량을 $10\sim 50\times 10^{-5}$ m³/s로 변화시켜 계산을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유량의 변화

Figure 6은 $Q=20\times 10^{-5}$ m³/s일 때, 이론해석 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 상기와 같이 이론해석은 입구 노즐 반경까지의 압력 변화는 일정하다고 가정하고, 식 (2), (3)을 풀어 나타내었다. N-S방정식을 적용한 수치해석 결과와 비교하여 이론해석의 결과는 전반적으로 비슷한 경향성이 나타났으며 압축성 조건일 때, 좁은 반경의 범위에서 압력강하가 나타났고, 이때 최저압력은 -4.7 kPa로 수치해석 결과와 거의 동일하였고, 비압축성 조건에서는 압축성과 비교하여 두 배 정도 낮은 압력강하가 나타났다. 이때 최저압력은 -10.1 kPa이다.

Figure 7은 $h=0.3$ mm로 고정시키고 유량을 변화시켰을 때의 수치해석 결과를 정량적으로 나타낸 그래프이며, 세로축은 공정 제품에 작용하는 압력이며, 가로축은 공정 제품의 반경(r)을 노즐 입구의 직경(d)으로 무차원화하여 나타내었다. 입구 노즐로부터 공기가 유입되어 공정 제품과 만나게 되면 공정 제품 중심에서 높은 압력이 발생하고, 이후 유입된 공기가 좁아진 간극사이를 통

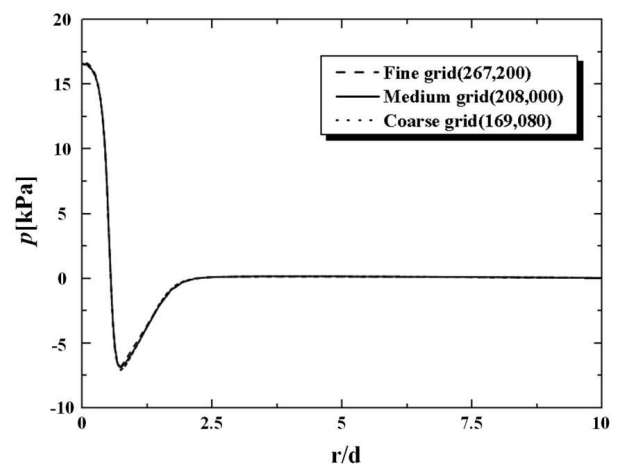


Fig. 5 Mesh independence study ($h=0.3$ [mm], $Q=23.6$ [$\times 10^{-5}$ m³/s])

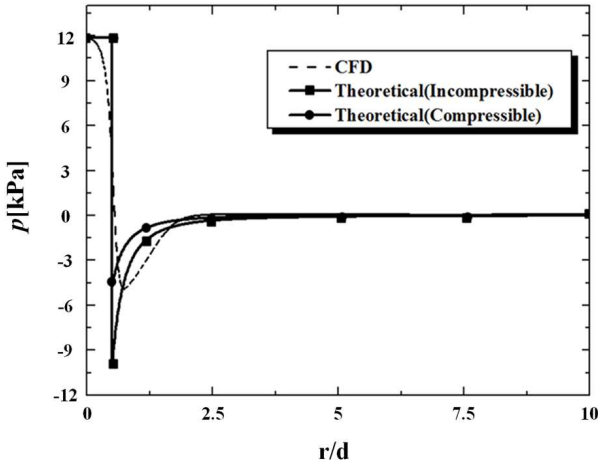


Fig. 6 Comparison of theoretical result and CFD prediction ($Q=20 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $h=0.3 \text{ [mm]}$)

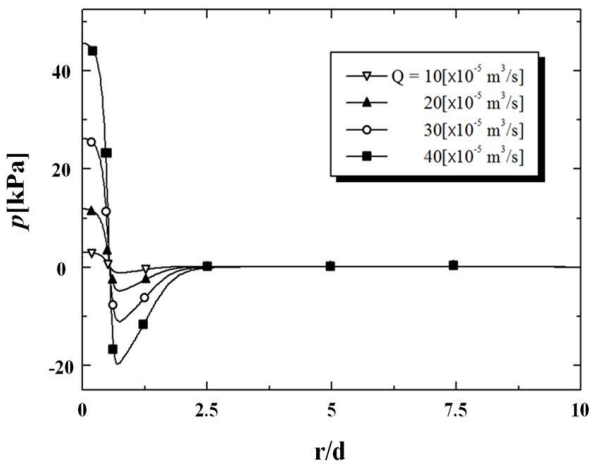
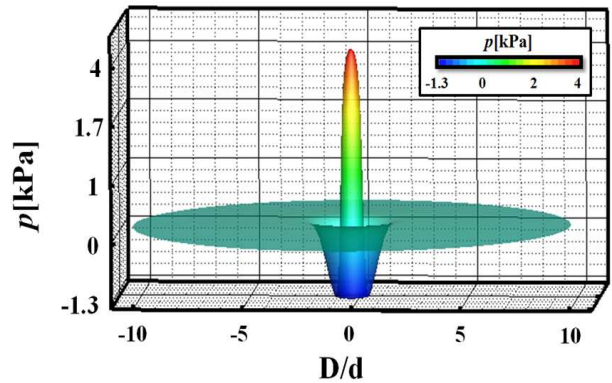
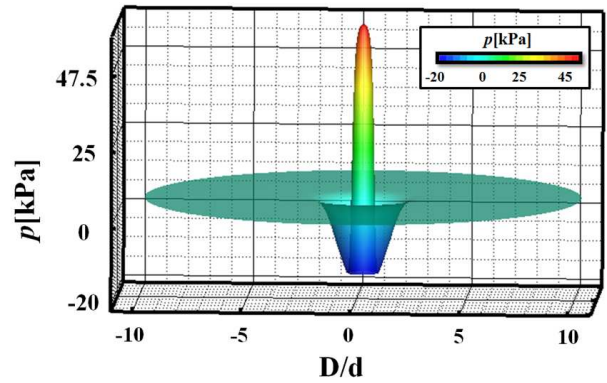


Fig. 7 Static pressure distribution on workpiece($h=0.3 \text{ mm}$)

과하여 공정 제품 위를 지나가게 되면 속도가 증가하게 되어 압력이 점점 낮아지게 된다. 그리고 공정 제품의 중심부분을 지나 주위로 흐르면서 공기의 유동은 안정되어 압력이 대기압과 같아진다. 따라서 유량이 커질수록 작용하는 압력은 상승하여 $Q=40 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 최고압력이 약 45 kPa이고 최저압력은 약 -20 kPa까지 제한된 면적에서 급격히 변화한다. 이때, 모든 유량에서 압력은 공정 제품의 중심에서 부터 r/d 가 약 2.5정도 떨어진 지점부터 0 kPa에 가까워져 일정하게 유지된다. 이러한 결과를 Fig. 8에 3차원 압력 Contour로 나타내었다. 공정 제품의 중심부에서 높은 압력이 나타나고 이후 r/d 가 약 2.5까지 제한된 면적에서 컵과 같은 압력강하가 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) $Q=10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$



(b) $Q=40 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Fig. 8 Contours of static pressures on workpiece($h=0.3 \text{ [mm]}$)

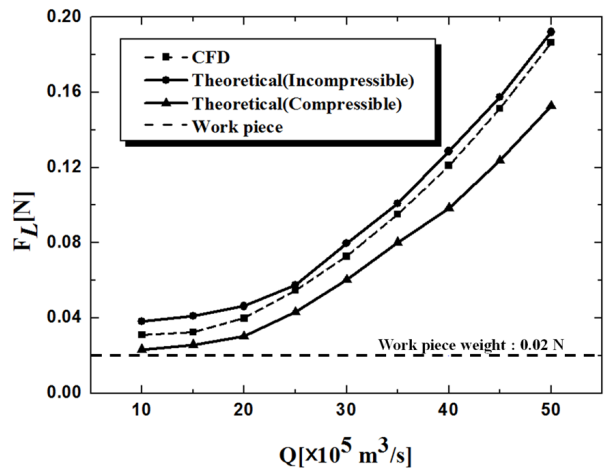


Fig. 9 Levitation force vs flow rate($h=0.3 \text{ mm}$)

Figure 9는 이론해석과 수치해석의 결과에 대해 유량에 따라 공정 제품에 작용하는 압력을 공정 제품 면적에 대해 적분한 후 부상력(F_L)을 계산한 결과를 정리하여 도시한 것이다. 이때 공정 제품의 자중은 0.02 N으로 설정하였다. 모든 결과에

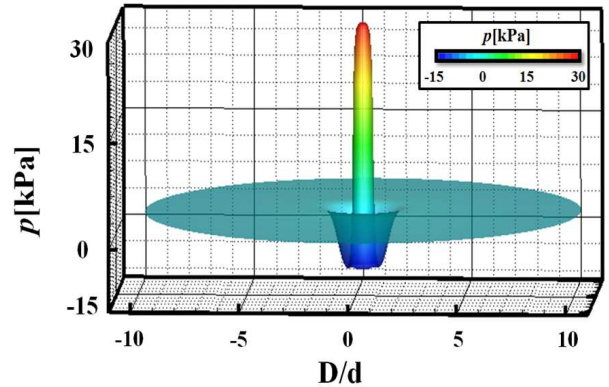
서 유량이 증가하면 부상력 또한 증가 하는 경향이 나타난다. 이때, 압력변화의 범위가 작은 압축성 조건에서 가장 작은 부상력이 나타났고 압력 변화의 범위가 큰 비압축성 조건에서 가장 큰 부상력이 발생하였다.

4.2 간극(h)의 변화

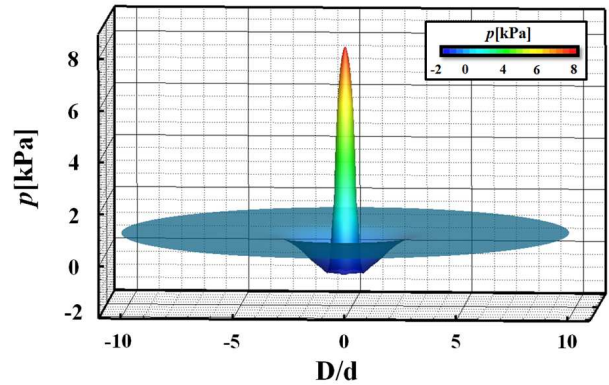
Figure 10은 동일한 유량에 간극을 변화 시켰을 때 공정 제품에 나타나는 각각의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 세로축은 압력, 가로축은 r/d 로 전술한 위의 결과와 유사한 압력 변화가 나타났는데, 동일한 유량에서 h 가 작을수록 큰 압력강하가 나타났다. 하지만 h 의 크기가 커지면 공정 제품 중심에서의 최고 압력은 감소하고, 최저 압력은 증가 한다. 또한, 공정 제품에 압력이 작용하는 면적은 점점 커져 넓은 범위에서 압력강하가 발생한다. Fig. 11의 3차원 압력 contour에서도 위의 결과를 확인할 수 있는데, 공정 제품에 압력강하가 나타나는 면적은 점점 커져 압력의 분포가 컵과 같은 형상에서 입구가 넓은 사발의 형상으로 변한다.

Figure 12는 다양한 h 에 대하여 상기와 동일하게 부상력을 계산하여 나타낸 그래프이다. 공정 제품의 자중은 0.02 N으로 동일하게 설정하였고, h/d 가 약 0.13정도일 때, 공정 제품의 자중과 부상력이 평형에 이른다. 그리고 h/d 가 0.1~0.15일 때, 부상력은 큰 폭으로 증가하였고, 이후 점점 증가의 폭이 줄어 $h/d=0.25$ 이후엔 거의 일정하

게 된다. 이는 공기가 좁아진 h 사이를 통과할 때 유동의 박리로 인하여 나타나는 유동의 최소 직경, 즉 흐름목으로 정의되는 Vena contracta⁽⁶⁾현상으로 설명할 수 있다. 즉 유체는 날카로운 모퉁이를 매끄럽게 돌 수 없기 때문에 상부에 재순환



(a) $h=0.2$ mm



(b) $h=0.6$ mm

Fig. 11 Contours of static pressures on workpiece($Q=23.6[\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}]$)

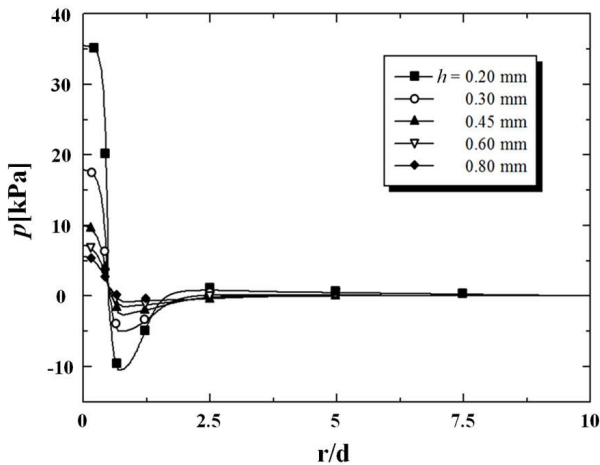


Fig. 10 Static pressure distribution on workpiece($Q=23.6[\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}]$)

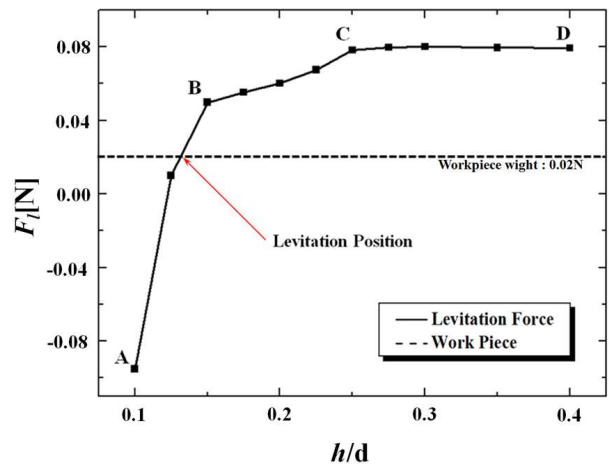


Fig. 12 Levitation force vs ' h '

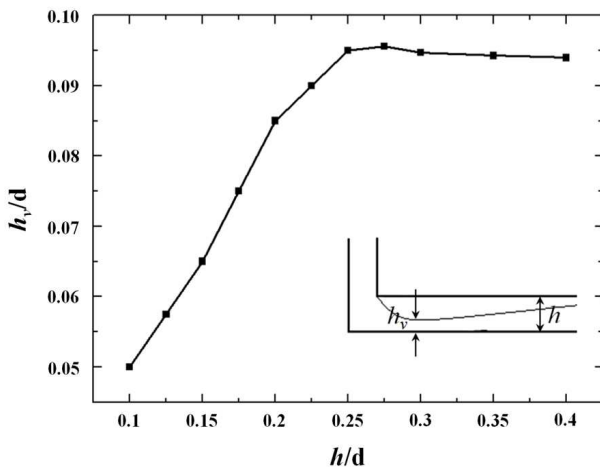


Fig. 13 'h' influence on 'h_v'(Q=23.6[×10⁻⁵ m³/s])

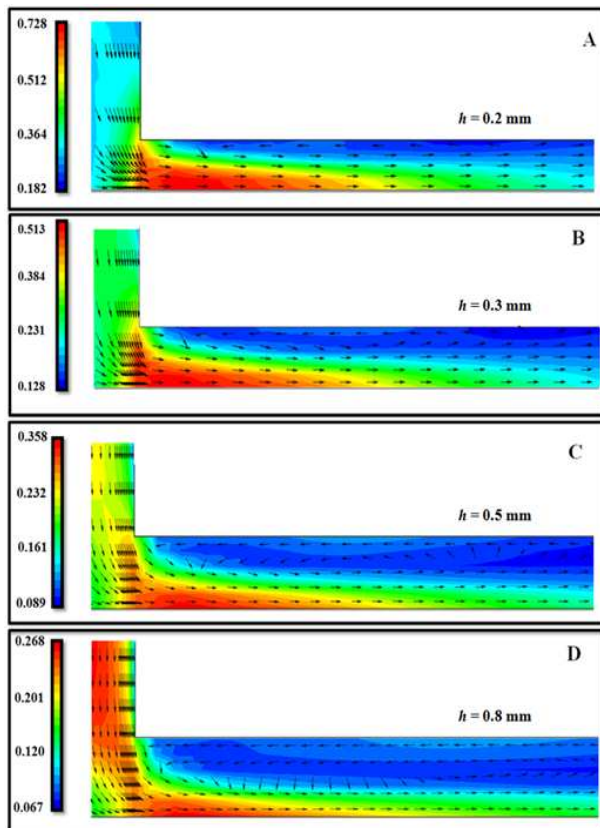


Fig. 14 Mach number Contours at different 'h'(Q=23.6[×10⁻⁵ m³/s])

영역이 발생하여 유동박리 현상이 나타나게 되는데, 이때 유로의 단면적이 줄어들게 된다. 이와 같은 결과를 Fig. 13에 정량적으로 나타내었다. 유동박리가 나타나는 지점에서 Vena contracta의 두께(h_v)를 측정하여 각 h에 따라 비교하였다. 부상력과 마찬가지로 h_v의 두께는 증가하다가 h

/d=0.25 이후 단조롭게 감소한다. 이러한 현상을 4가지 h에 대해 마하수 contour로 Fig. 14에 각각 나타내었다. h가 커짐에 따라 상부에서 발생하는 재순환 영역이 넓은 면적에서 발생하여 Vena contracta 현상이 h의 크기에 상관없이 일정하게 나타나게 된다. 이는 유동박리에 의해 발생하는 Vena contracta 현상이 공정 제품의 압력 변화에 영향을 미친다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 베르누이 부상유동의 특성을 조사하기 위하여 이론해석과 수치해석을 수행하였다. 3차원 형상의 모델을 사용하여 공정 제품과 이송장치를 형상화 하여 공정 제품의 유동 특성을 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) h가 일정한 경우, 유량이 증가함에 따라 발생하는 부상력도 증가한다.
- (2) 유량이 일정한 경우, h가 증가함에 따라 부상력이 증가하다가 일정 값에 도달한다.
- (3) h 값이 어떤 값 이상으로 되면 부상력이 발생하게 되는데, 본 연구에서는 h/d=0.13 정도에서 발생하였다.
- (4) h/d가 0.25이상 되면 부상력이 일정하게 되며, 이는 내부에서 발생하는 유동박리에 의한 Vena contracta 현상에 기인한다.

참고문헌

- (1) Chang, H. S., Park, Y. J., Chang, Y. S. and Kong, J. Y., 2006, "CFD Analysis for Concept Design of Air Levitation Transport System," *Journal of the KSME*, Vol. 40, No. 9, pp 512~516.
- (2) Vincent, V., Pierre, L. and Alain, D., 2005, "Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation," *Precision Engineering* 29, pp 491~505.
- (3) Li, X., Kenji, K. and Toshiharu, K., 2008, "Analysis of vortex levitation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp 1448~1454.
- (4) Toshiharu, K. and Li, X., August 17-21, 2009, "vortex levitation," *10th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (FLUCOME 2009)*, Moscow, Russia
- (5) Waltham, C., Bendall, S. and Kotlicki, A., 2003, "Bernoulli Levitation," *American Journal of*

- Physics*, Vol. 71, No. 2, pp. 176~179.
- (6) Young, Munson, Okiishi, Huebsch, 2007, "A Brief Introduction to Fluid Mechanics," *Wiley*, 4th Edition, pp. 66~72.
- (7) White F. M., 1999, "Fluid Mechanics," *McGraw-Hill*, 4th Edition, Section 6
- (8) Toshiharu, K., 2008, "New Pneumatic Techniques and Applications," *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power(TOYAMA 2008)*, ISBN 4-931070-07-X
- (9) Moon, I. H. and Hwang, Y. K., 2004, "Evaluation of a Propulsion Force Coefficients for Transportation of Wafers in an Air Levitation System," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 820~827.
- (10) Ko, H. J., Kim, J. H. and Kim, J. H., 2009, "A Study of Non-Contact Transfer Handler Using Bernoulli Theory," *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering*, pp. 621~622
- (11) Moon, I. H. and Hwang, Y. K., 2006, "Evaluation of a Wafer Transportation Speed for Propulsion Nozzle Array on Air Levitation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 30, No. 4, pp. 306~313
- (12) Brandt, E.H., 1989, "Levitation in Physics," *Science*, Vol. 243.
- (13) Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.