

비접촉식 그리퍼 적용을 위한 공기압 파지식 헤드 내부 관통로 고찰

김준현*

(Manuscript received: Jan, 16, 2012 / Revised: Apr, 23, 2012 / Accepted: Apr, 30, 2012)

Study on Through Paths Inside the Air Pressure Pick-Up Head for Non-Contact Gripper

Joon Hyun Kim*

Abstract

In the semiconductor and display device production processes, the handling of sensitive objects needs new carrying technology. Floating carrying motion is a practical alternative solution for non-contact handling of parts and substrates. This paper presents a study of through paths inside the air pressure pick-up head to generate the floating motion. The air motion by conceptual designed paths inside the head gradually develops positive pressure and vacuum between narrow objects. Positive pressure occurs through the head tip before discharging outside of the head. Negative pressure is developed by evacuating the inside head bottom as result of the radial flow connecting the vertical through-holes. The numerical analysis was done to figure out the stable levitation caused by the two acting forces between surfaces. In comparing with the standard case that the levitation gap gets 0.7-0.9 mm, it confirms the suggested head characteristics to show floating capacity in accordance with the head size, number of through-hole, and locations of through-hole in succession of conceptual design for a prototype.

Key Words : Air levitation(공기 부상), Air pressure pick-up head(공압 파지식 헤드), Non-contacting(비접촉), Robot hand(로봇 핸드), Through-hole(관통홀), Wafer gripper(웨이퍼 그리퍼)

1. 서론

통상 기계적 가공을 위한 공정에서 공정품은 접촉을 유지한 채 다루어지고 이송이 된다. 반도체용 실리콘 웨이퍼도 최근까지 로봇 핸드에 의해 날장 방식으로 직접적으로 표면 접촉이 불가피하게 이루어져오고 있었다. 특히 반도체 공정을 통하여 빈번하게 적재(loading)와 양하(unloading)하는 과정에서 발생하는 표면 오염과 스크래치 손상과 같은 문제는 수율 향상을 이루어 원가절감을 확보하는데 걸림이 되고 있는 실정이다^(1,2). 현재 높은 수율을 위해 웨이퍼 직경이 300mm(11.8 in) 이상으로

확대되고 이에 따른 접촉식이 가지는 근본적인 문제를 해결하기 위하여 비접촉 방식으로 웨이퍼 공정품을 취급 및 이송하는 기술과 방법들이 다양하게 개발되고 있다⁽³⁾.

일반적으로 자기장, 정전기, 근거리장, 공압을 이용하여 일정한 힘으로 이격거리를 유지하는 방식으로 공정품을 파지하고 있다. 그러나 자기장, 정전기 방식은 전도물질의 성질에 제한을 받으며 근거리장은 공정품의 표면상태와 강성에 민감하며, 무엇보다도 장비의 구조적인 문제로 인해 상부로부터 파지하기 위한 접근이 상당히 제약적이다⁽³⁾. 이러한 문제에서 다소 자유로운 공압을 이용하는 방식은 청정공기를 사용하여 표면 오염

* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (joonk61@seoultech.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

의 가능성을 줄이고 열과 자기장 발생이 없으며 모든 재료에 적용가능하다^(4,5).

따라서 접촉식 로봇 그리퍼에 공압라인과 베르누이 원리에 의한 공기압 파지식 헤드 모듈(이하 헤드로 칭함)만을 장착하여 비접촉으로 파지 가능한 점은 기존의 로봇 시스템이 가지는 기구학적 운동 경로에 큰 수정 없이 사용 가능하게 된 것이 큰 장점이다. 또한 상부 파지 방향이 갖는 공간 활용 효율이 높고 파지 능력의 안정성이 확보되어 생산성 향상에도 기여가 크다. Fig. 1은 베르누이 효과를 유발하는 사이클론 유동 흐름에 의해 헤드 내부와 웨이퍼 표면 사이에 작용하는 양압, 부압 형성과 공정품의 파지에 의한 편평도에 대한 일반적 결과를 도시하고 있다. 이러한 베르누이 방식은 헤드 내부 형상에 따라 적절한 양압과 부압영역의 동시 형성이 가능하게 하고 웨이퍼 자체 하중에 대응하는 내부 부압(진공압)에 의한 일정 파지 능력(부양력)을 유지 가능하게 하는 것이 설계 지표이다^(6,7).

공압을 이용하는 방식이 기술적 접근성면에서 유리하고 제작에서도 경제적이다. 그러나 Fig. 1에서 보는 것과 같이 사이클론 형태 방식은 양압과 부압의 영역 형성이 뚜렷하지 않고 부분적인 웨이퍼 표면상 위로 가급적으로 균일한 크기의 부상력을 제공할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 최소한의 공기소모량을 유지하면서 안정적인 부상력을 갖기 위한 추가적인 연구들이 많이 진행되고 있다^(8,9).

최근에는 단일 공압 라인과 하부 토출 부위에 반사판을 두거나 하부에 토출공과 흡입공을 번갈아 배치하여 양압과 부압이 혼용 형성되게 하는 등 토출 형태에 따라 형성되는 유동 형태에 의해 일정하고 안정적인 웨이퍼 파지력을 위한 균형점을 제공할 수 있도록 하는 문제점 해결에 많이 집중되어 있다^(4,10).

따라서 본 연구는 기본 형상에 대한 개념적 연구⁽¹¹⁾에 이어 단일 공압 라인을 따라 방사형으로 유동하면서 내부적으로 오리피스 형태의 관통로를 통하여 내부 진공도를 상승시키는 12인치 이하 웨이퍼의 직경에 대응되는 3개의 크기가 다른 모델을 제

시한다. 그리고 각각의 모델이 가지는 최소한 이격거리 확보와 이에 대응하는 고른 부압영역의 안정적인 확보를 하기 위한 헤드의 사양을 검토한다. 그리고 헤드의 내부 관통홀에 따른 유동 흐름에 대한 해석을 통하여 설계 변수를 추가 도출을 하는데 주안점을 둔다.

2. 부압 형성을 위한 형상 모델

2.1 세부 형상 구조

단일 공압라인을 중앙부에 연결하여 방사형 확장통로로 거쳐 밖으로 기체를 토출 시키는 유동을 하게끔 내부 형상을 가지는 기본적인 헤드의 개념적 형상은 이전 연구⁽¹¹⁾에서 도출되었으며, 헤드의 외형적 형상은 Fig. 2와 같다. 헤드는 기존 연구⁽¹¹⁾의 M-10(직경 10cm, 두께 2cm)이 표준 설정되며 추가적으로 M-15(직경 15cm, 두께 2cm) 그리고 M-3(직경 3cm, 두께 1cm)의 총 3종류의 설계모델로 수행한다. 최종 조립 형태는 상, 하부로 구성되며 하부 조립체에는 수직으로 관통하는 미세 통로가 다수 존재하게 된다.

Fig. 2에서 제시된 헤드의 세부적 형태 및 구조에 대하여 기체 역학적 해석을 위한 수치연산 영역은 Fig. 3에서 보여주고 있다. Fig. 3은 하단부 웨이퍼 표면과 헤드 내부의 구조 형태가 45도 간격으로 반복되는 형태로써 8분의 1의 모양을 취하고 있다.

공기의 흐름은 상부 중앙 공압 라인 연결부에서 시작되어 중앙 주입통로를 따라 아래로 이동한 후 방사형으로 이루어지는 수평 미세통로를 따라 분리 되어 노즐 형태로 확산 분리되는

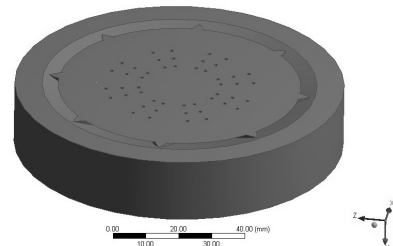


Fig. 2 Conceptual design of the air pressure pick-up head to build under-pressure by using pneumatic power

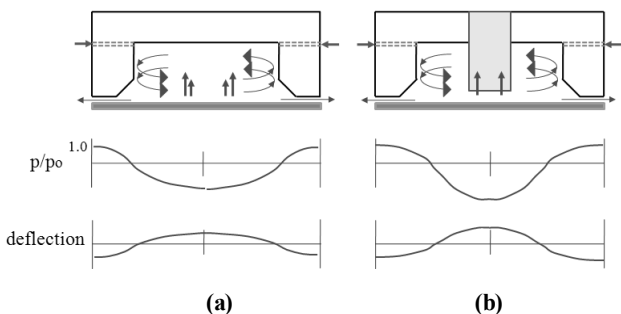


Fig. 1 Mechanism of swirl flow inside air cup (air pressure pick-up head), and typical pressure distribution and flatness of substrate, (a) conventional vortex cup using air swirling flow, (b) modified vortex cup using air swirling flow and central discharge air flow

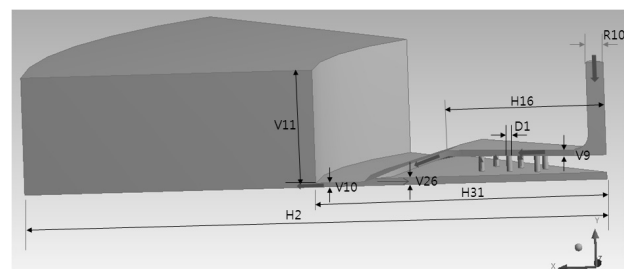


Fig. 3 Computational domain and dimensions for the flow region of the sectional head

유동을 하게 된다. 이러한 상부 미세 통로를 따라 이루어지는 유동은 일정 각도로 아래로 향하는 통로에 의해 하향 흐름을 유지하면서 대부분 웨이퍼 표면과 헤드의 끝단(tip) 틈새를 통하여 밖으로 토출되게끔 되어 있다. 그리고 내부의 수평 확산 통로는 중앙 하부와는 다수의 미세한 연결 수직 통로로써 관통되어 있다.

2.2 내부 진공압 형성을 위한 이론적인 접근

웨이퍼 상부와 헤드의 중앙 하단부분으로 이루어지는 일정 공간이 적정 공기 유동에 의해 기체가 제거되는 환경을 유지하면 대기압 이하의 약한 진공이 조성되어 웨이퍼 표면위에 작용하는 흡입력이 기체의 토출 시의 충돌 반발력과 자중력에 대응하여 헤드와 웨이퍼 표면 사이를 일정 간격으로 파지하게 되는 능력을 유지되게 된다.

현재 1기압에서 10^{-3} Torr에 해당되는 저진공(low vacuum) 수준은 현장 식품가공 산업과, 박판(thin film), 플라즈마 등의 제조 산업에 직, 간접적으로 활용되고 있다⁽¹²⁾. 따라서 현재의 구조에서 헤드와 웨이퍼 표면 사이의 내부 공간 내에 존재하는 잔존 기체를 서서히 방출하게 하여 저진공 수준을 유지하는 것이 주목적이 된다.

기체의 평균자유거리와 원통관의 지름의 비율로 기체의 흐름을 결정짓는 크누센수(Kn)가 0.01 이하인 점성류의 유동에서 헤드 하단부의 내부 공간 내로 유입되는 기체량을 억제시키고 잔존 기체들을 토출함으로써 저진공 상태 구현이 가능하다.

즉, 벤츄리관처럼 기체가 강하게 유동하게 되는 상부 수평 미세 통로와 수직으로 연결되는 관통홀들이 만나는 지점에서 토출 펌프 역할을 하는 점성유동 흐름의 효과와 기체의 역류현상을 막고 이 지점까지 기체를 잘 통과 시킬 수 있는 관통홀 길이와 직경에 따라 가능하다.

관이나 구경(aperture)와 같은 두 부분을 연결하는 전도 요소를 지나가는 기체의 유량(Q)은 입구(i)와 출구(f)에서의 압력차 Δp 에 비례한다⁽¹³⁾. 즉,

$$Q = C\Delta p = C(p_i - p_f) \tag{1}$$

여기서 비례상수 C는 컨덕턴스(conductance)이며 단위는 m^3/s 또는 L/S 이다. Fig. 4처럼 지름이 d 이고 길이가 l 인 원형관의 컨덕턴스는 $C = Q/(p_i - p_f)$ 이고 유량(Q)이 Poiseuille법칙에 따라 이루어짐에 따라 다음과 같이 정리된다.

$$C = \frac{\pi d^4}{128\mu l} \bar{p} \tag{2}$$

여기서 관의 평균압력은 $\bar{p} = (p_i + p_f)/2$ 이다.

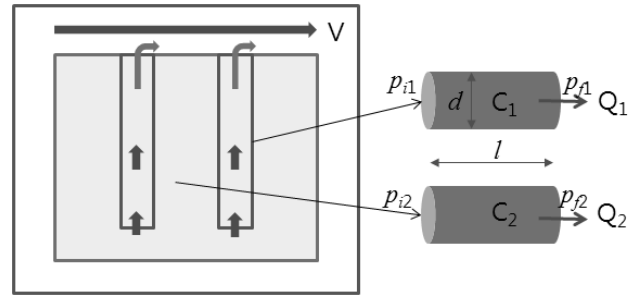


Fig. 4 Diagram for vacuum effects caused by viscous flow

점성류의 경우 컨덕턴스는 원통관의 크기($\propto d^4, l^{-1}$), 기체의 성질($\propto \mu^{-1}$), 압력($\propto \bar{p}$)에 관계된다. 적절한 관통홀(도관) 크기의 선택으로 점성류가 유지되는 수준에서 입출구의 압력차를 유발하여 서로 반대 방향으로의 유량 차이에 의해 저진공 상태를 유지하게 된다.

또한 Fig. 4에서 도시한 것처럼 원통관이 병렬로 관통되어 있을 때 입출구의 압력차($\Delta p = p_i - p_f$)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta p_1 = Q_1 \left(\frac{1}{C_1} \right) \tag{3}$$

$$\Delta p_2 = Q_2 \left(\frac{1}{C_2} \right) \tag{4}$$

다수의 관통로가 존재하여 병렬 구성되고 각각의 압력강하에 의해 토출되면 총 유량은 다음과 같이 나타난다.

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \Delta p_1 + C_2 \Delta p_2 \tag{5}$$

따라서 저진공 영역 확보는 다수의 관통홀의 출입구에서 압력차의 유발과 적절한 컨덕턴스의 존재에 좌우되게 되어 있다.

3. 해석 및 고찰

3.1 개념설계 단계 모델에서의 해석조건 설정

웨이퍼와 같은 물체를 안정적인 얼라인먼트(alignment) 파지 능력을 향상시키기 위한 내부 유동에 대한 수치적 계산을 토대로 해석하고자 3개의 사양을 설정하였다. 이 사양은 12인치급 웨이퍼뿐만 아니라 LCD 클래스 이송용에 맞게 크기를 적용했다. 헤드의 직경(3cm, 10cm, 15cm)과 두께(1cm, 2cm)별로 세부 형태의 제원을 Fig. 3과 Table 1에서 정리 표현하였다. 주입되는 공기압은 2-3bar(통상 2.5-5bar 범위)로 설정했다.

Fig. 3은 반복 대칭형에 의한 45도에 해당되는 1/8 유동 영역

이며 유동 통로의 좌우는 대칭 경계 조건이며 방사형 유동 흐름이 헤드 하단으로부터 토출되어 헤드 외부로 유동하는 영역을 각 모델의 반경(H31)에 해당되는 범위로 설정(단, M-3은 50mm)하고 마지막 도달되는 지점은 평균 정압수준으로 경계조건으로 주었다. 그리고 웨이퍼 표면과 헤드 벽면에서 유체의 속도는 0으로 지정하였다.

해석 격자계는 해당되는 면에 각각 다른 요소 크기(작은 요소의 경우는 1.5×10^{-5} m)로 설정하여 크기가 작은 모델 M-3의 경우는 전체적으로 500,000개 정도의 노드(node)가 사용되어 중요한 계산 영역 부위에는 조밀한 격자가 적용되었다. 그리고 본 연구에서는 예비 과정을 통하여 연속 및 운동량 식에서 수렴 판정 기준 10^{-4} 평균 잔류값을 만족시키도록 결정하였다. 전체적인 격자 형상은⁽¹¹⁾에 제시되어 있다.

3.2 모델별 웨이퍼 표면위에 작용 하는 압력 분포

직경 10cm의 표준 헤드 모델의 크기(Table 1의 M-10)를 기본으로 하고 웨이퍼와 헤드의 팁(tip) 하단간극을 0.5mm에서 1.5mm 범위 내에서 설정하여 수행하였으며 그 결과는 Fig. 5에서 웨이퍼 표면위치에 따라 작용력의 추이를 보여준다.

웨이퍼와 그리퍼(헤드 하단 부) 사이의 비접촉 이격거리는 가장 중요한 설계 변수이며 Fig. 5는 다양하게 비접촉 간격을

Table 1 Detailed sectional dimensions of proposed air pressure pick-up heads (ref. Fig. 3)

symbol	unit	Model		
		M-10	M-15	M-3
		value		
R10	mm	3	3	1
H16	mm	27.5	47.5	5
H2	mm	100	150	50
V11	mm	19.5	19.5	10
V26	mm	1.2	1.5	0.8
V9	mm	1	1	0.5
V10	mm	0.7	1.0	0.3
D1	mm	1	1	0.4
H31	mm	50	75	15
Inlet pressure	bar	3	3	2
Number of vertical through holes		6-10	6	4

Table 2 Comparative evaluation of air pressure pick-up heads

Type	M-10	M-3	M-15
Size (diameter)	100mm	30mm	150mm
Lifting force (N)	0.9 for 3 bar	0.5 for 2 bar	2.0 for 3 bar
Non-contact Gap	0.7-0.9mm	0.3-0.5mm	1.0-1.1mm

설정하여 웨이퍼 전 표면($A = \sum_{i=1}^N A_i$)에 대하여 나타난 압력(p_i)의 결과로써 분포력($F = \sum_{i=1}^N p_i A_i$)을 계산한 결과이다. 0.7

- 0.9mm의 비접촉 간격 범위 내에서 면에 미치는 진공 작용력과 토출 반발력+자중의 힘의 균형 유치가 가능함을 알 수 있다. 이외 범위에서는 접촉 또는 이탈의 결과를 예측해볼 수 있다.

상기 결과를 바탕으로 비접촉 간격 유지를 0.8mm로 하여 3개의 모델에 공통적으로 적용한 계산 결과로써 Table 2에서 작용력의 성능 비교 평가로, Fig. 6에서 웨이퍼 중심부에서 원주 방향 거리에 따라 작용하는 압력 분포를 나타내었다.

M-10 모델은 내부(대략적으로 Fig. 3의 H16 부분)에서 고른 안정적인 진공분포를, 그리고 M-15 모델은 보다 더 강력한 진공영역을 바탕으로 파지력의 향상이 가능함을 볼 수 있다. 그러나 모델 M-3은 소형 헤드인 관계로 동등한 주입 공기압과 내부 유동 통로의 크기가 제한적이어서 안정적이지 못함을 알 수 있다.

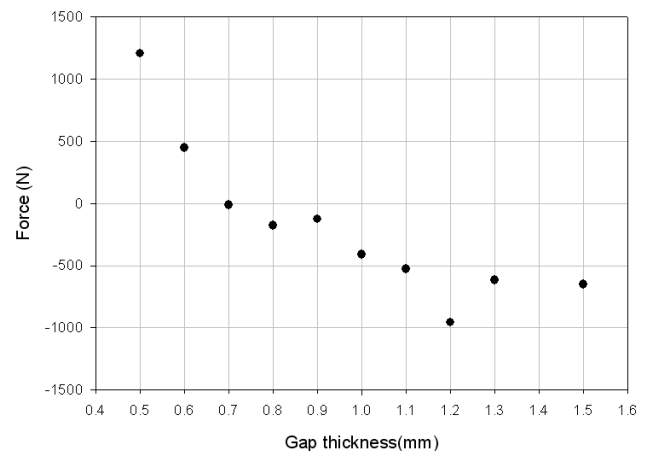


Fig. 5 Levitation force acting on the wafer surface under the air pressure pick-up head

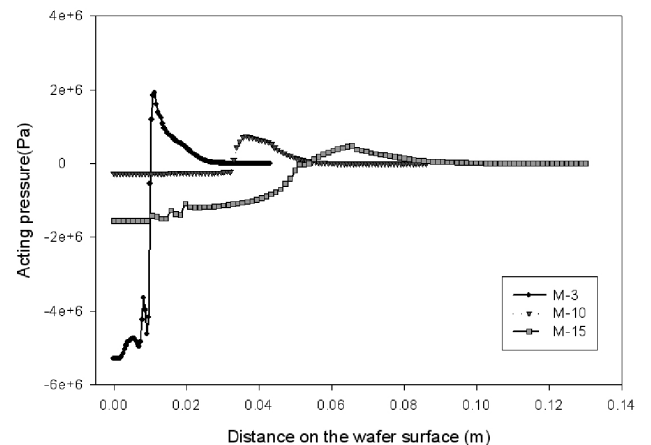


Fig. 6 Plots of acting pressure vs. distance from the center line of the path

각 요소에 작용하는 압력이 $p = p_c + (W_g/A)_e$ 에 의해 결정되는 것처럼 헤드의 직경에 따라 다르다. 이는 초기 주입 공기압(3bar)에 의하여 주입되는 공기가 방사형으로 토출 될 시 헤드 밑면과 웨이퍼 표면 사이를 빠져 나갈 때 단위면적당 차지하는 공기량의 차이에서 오는 결과로 기인된다. Table 2에서 나타난 것처럼 단동 헤드 모듈을 크기별로 적용하는 경우 직경이 클수록 넓은 지역에서 진공압을 얻어 그 만큼 파지력이 커짐을 볼 수 있다.

3.3 내부 진공 형성을 위한 내부 관통홀의 위치영향

표준 모델 M-10의 조건에서 내부 관통홀 위치를 중심에서 5mm 간격으로 Table 3과 같이 3행 2열 배치하여 총 6개를 유지했을 때 나타나는 표면 형상은 Fig. 7이다. 그리고 각각 A, B, C 경우와 같이 3개의 동심원상에 배열되는 관통홀의 위치를 중심으로부터 가까이 또는 멀리 배열했을 때 계산 결과들이 Fig. 8과 9이다. 중심에서 8.5mm과 10.5mm 원주상에 첫 번째 행의 홀이 위치할 때는 안정적인 부압부 형성이 가능하다. 또한 1번 홀 원주상 위치를 14.5mm 이상으로 유지하는 경우는 Fig. 9에서 보는 것처럼 양압부의 크기가 크게 증가한다. 따라서 적정 위치 범위는 $10 \pm 2mm$ 범위 내에서 첫 번째 관통홀이 위치해야 하며 5mm 간격으로 3행의 관통홀을 위치 적용한다.

관통홀의 위치에 따라 관통홀 상부를 통하여 지나가는 기체의 점성 이끌림으로 각각의 위치에서 토출되는 비율이 다르고

또한 Fig. 8에서 관통홀이 중심에서 멀어질수록 속도가 저하되고 따라서 진공압의 형성분포 영역에서 변화가 있음을 볼 수 있다. 기체의 팽창 흐름을 유지하는 노즐 확산 부분의 형상 설계는 기존 연구⁽¹¹⁾에서도 일부 언급되고 있으며 현재 개념 단계 연구에서 도출된 조건은 최적의 상태로 고려된다.

Table 3 Hole positions of the air pressure pick-up head (M-10)

Array position of through holes (mm)	1st row	2nd row	3rd row
Case A	8.5	13.5	18.5
Case B	10.5	15.5	20.5
Case C	14.5	19.5	24.5

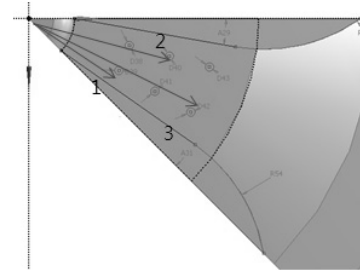


Fig. 7 Top view of the through hole array inside the air pressure pick-up head

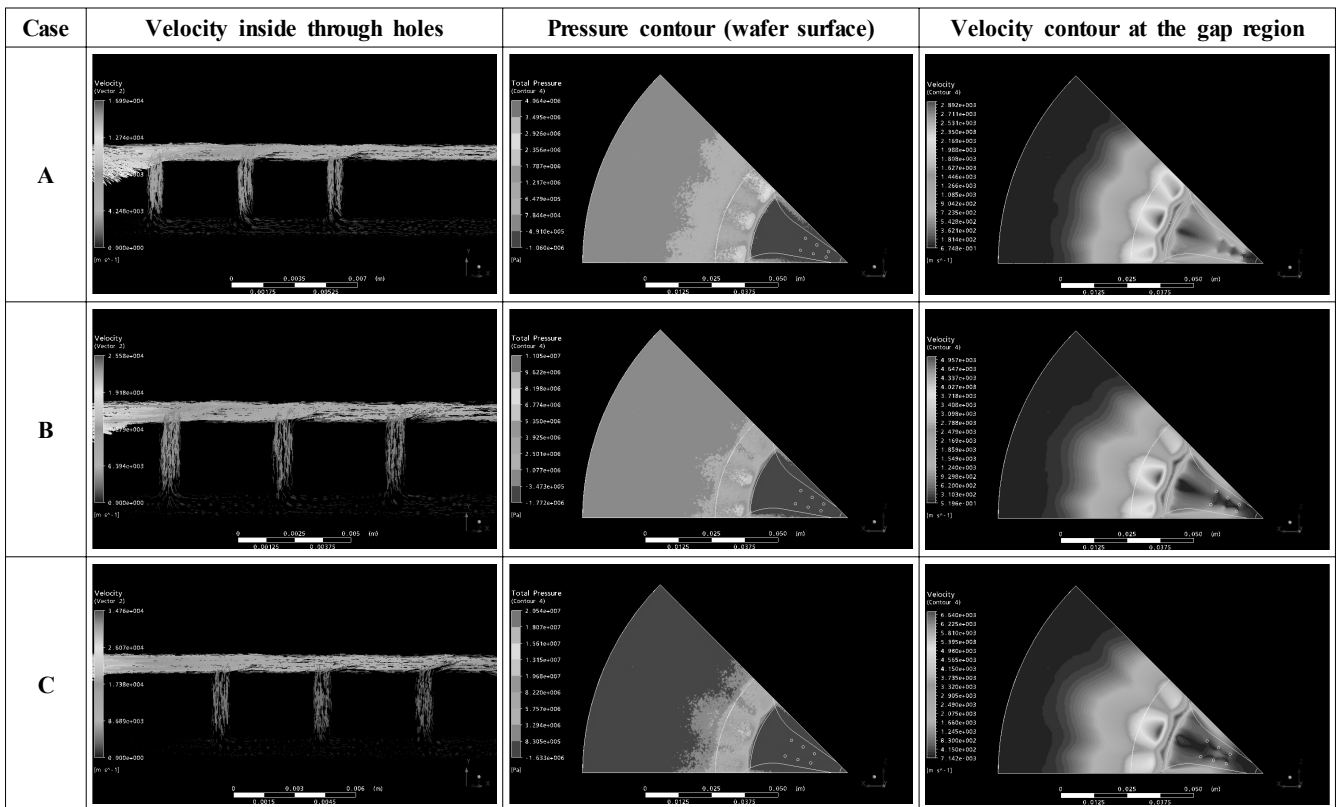


Fig. 8 Plots of dynamic results affected by various through hole array (ref. Table 3)

3.4 내부 진공 형성을 위한 내부 관통홀의 개수 영향

표준 모델 M-10에 6개의 관통홀 적용 대신에 Table 4의 D와 E 경우처럼 관통홀 첫 행 위치를 중심에서 10.5mm에 위치시키고 4mm 간격으로 2행 4열 그리고 3mm 간격으로 2행 5열로 하여 총 관통홀 개수를 8개와 10개를 유지했을 때 웨이퍼 표면에 작용하는 거리별 압력 분포 형성 결과는 Fig. 10에서 보여준다. 1/8 크기의 원주상 중형 배열되는 직경 1mm의 관통홀의 수를

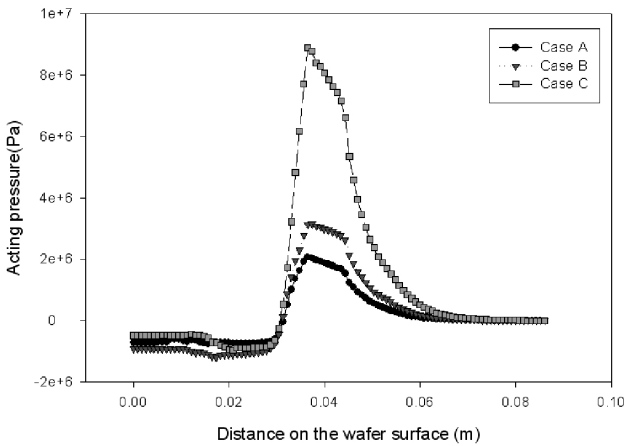


Fig. 9 Plots of static pressure vs. distance from the center line of the path (standard model (M-10), 3 bar, 0.7mm gap)

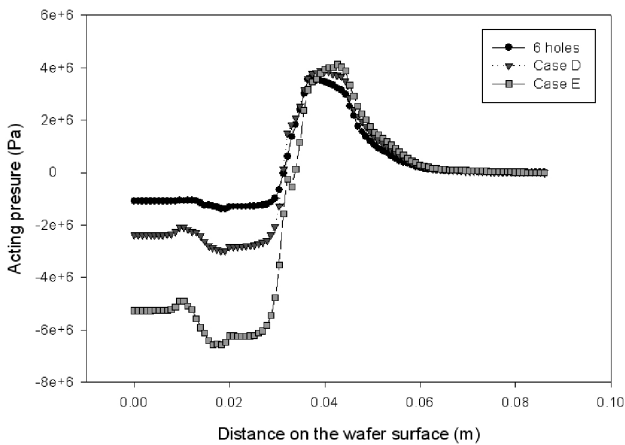


Fig. 10 Plots of static pressure vs. distance from the center line of the path applying to air pressure pick-up head with different number of through holes (standard model M-10, 3 bar, 1.0mm)

Table 4 Distance from the center for different hole arrays

Case	# of through hole	Array type	Distance form the center to the circumferential columns (mm)
D	8	2rows 4columns	10.5, 14.5, 18.5, 22.5
E	10	2rows 5columns	10.5, 13.5, 16.5, 19.5, 22.5

8개에서 10개로 증가시켜 나갈 때, Eq.(5)에서 언급한 것처럼 진공을 형성하는 헤드 하부 공간 영역에서 적절한 원통관을 통하여 나가는 기체량은 관통홀의 수가 많아짐에 따라 증가하므로 진공도를 높일 수가 있다. 그 결과로 표준 모델과 1.0mm 비접촉 간격 설정조건에서 관통홀 수의 증가는 내부 형성되는 진공압이 양압부의 압력보다 훨씬 커지는 양상을 Fig. 10에서 알 수 있다.

따라서 개념 설계 도출 형상인 M-10 표준 모델에서 적용한 1mm 직경과 길이 3mm의 관통홀의 적정 개수는 6개이며 1mm 관통홀 직경을 사용할 경우 8개까지 적용 가능하다. 단, 8개를 적용 할 경우는 6개를 적용하는 경우보다 동시에 높은 부압부 압력 분포를 생성하게 된다. 10개의 경우는 재료가 단단하고 최소한의 이격 거리를 유지하는 파지 가능성에 유리할 것으로 판단된다. 3기압으로 주입되어 1mm 두께의 내부 확산되는 통로를 따라 유동하게 되는 기체의 속도와 점성류 기체 사용 조건에 맞는 관통홀의 크기는 직경 1mm 길이 3mm로 적정 설정되며, 수행된 결과에서 다수의 관통홀 존재는 내부 진공력 상승에는 도움이 되는 것을 웨이퍼 표면에 작용하는 압력 분포도(Fig. 10)로 확인 할 수 있다. 단, 실제에서는 관통홀 수의 증가는 진공압력의 상승으로 비접촉 간격을 좁힘과 동시에 토출압력의 상승을 유발을 반복하면서 적정 접촉 간격을 유지하거나 이러한 과정을 수반하면서 불안정한 부상 상태를 유지 될 것으로 판단된다.

4. 결론

현재 베르누이 원리를 이용하는 비접촉 그리퍼에 적용하기 위한 헤드에 대한 안정적인 고른 부상력 형성을 위한 개념적 설계 관점에서 중심방향에서 원주 방향으로 공기가 확산 방출 되는 통로 형성과 기체 역학적으로 진공 영역을 유지하게 하기 위하여 내부 통로와 헤드 하부 부분을 연결하는 다수의 관통홀의 영향으로 분석하였다.

- (1) 웨이퍼 및 LCD glass 적용 확대 개념으로 단동 직경 크기의 헤드 모델을 3, 10, 15cm로 설정하고 비접촉 이격거리를 변화(0.5-1.5mm)에 따른 균형적인 파지힘을 유지하기 위한 양압과 부압을 동시에 발생시키는 구조를 확인하였다.
- (2) 각 모델별로 수행된 수치적 계산을 토대로 힘의 균형이 이루어지는 비접촉 이격거리와 부상능력을 추정하였다 (Table 2).
- (3) 10cm 직경의 헤드에 적용되는 관통홀의 적절한 크기인 직경과 길이는 각각 1mm, 3mm가 힘의 균형에 미치는 진공 능력 발생에 안정적임을 확인하였다.
- (4) 헤드의 직경 10cm 설계 모델에 내부 관통홀의 위치와 개수를 달리 적용하여 나타나는 최적의 결과를 토대로 6개의 관통홀의 위치가 도출되었다.

후 기

이 논문은 2012년 중소기업 기술혁신개발사업 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- (1) Fearing, R. S., 1995, "Survey of Stacking Effects for Micro Parts Handling," *In: Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 212~217.
- (2) Guldi, R. L., Whitfield, M. T., and Foag, F. D., 1999, "Strategy and Metrics for Wafer Handling Automation in Legacy Semiconductor Fab.," *IEEE Transactions on Semiconductor*, Vol. 12, No. 1, pp. 102~108.
- (3) Vandaele, V., Lambert, P., and Delchambre, A., 2005, "Non-contact Handling in Microassembly: Acoustical Levitation," *Precision Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 491~505.
- (4) Davies, S., Gray, J. O., and Caldwell D. G., 2008, "An End Effector based on the Bernoulli Principle for Handling Sliced Fruit and Vegetables," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, No. 2, pp. 249~257.
- (5) Vandaele, V., Lambert, P., and Delchambre, A., 2005, "Non-contact Handling in Microassembly: Acoustical Levitation," *Precision Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 491~505.
- (6) Waltham, C., Bendall, S., and Kotlicki, A., 2003, "Bernoulli Levitation," *American J. Physics*, Vol. 71, No. 2, pp. 176~179.
- (7) Li, X., Kawashima, K., and Kagawa, Y., 2008, "Analysis of Vortex Levitation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, No. 8, pp. 1448~1454.
- (8) Dini, G, Fantoni, G., and Failli, F., 2009, "Grasping Leather Plies by Bernoulli Grippers," *Cirp Annals*, Vol. 58, No. 1, pp. 21~24.
- (9) Chen, X. -D., and He, X. -M., 2006, "The Effect of the Recess Shape on Performance Analysis of the Gas-lubricated Bearing in Optical Lithography," *Tribology International*, Vol. 39, No. 11, pp. 1336~1341.
- (10) Air Bearing, 2003, *Air Bearing Application and Design Guide*, New Way Precision, rev D, pp. 4~12.
- (11) Kim, J. H., "Design of the Air Pressure Pick-up Head for Non-Contact Wafer Gripper," *Journal of Manufacturing Engineering and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 401~407.
- (12) O'Hanlon, J. F., 2003, *A User's Guide to Vacuum Technology*, Wiley, New Jersey.
- (13) Kim, H. -H., Hwang, Y. W., Park, D. H., and Lim, K. -J., 2000, *Introduction to BASIC VACUUM Engineering for Semiconductor and Display Processing*, NaeHa Press, pp. 52~56.