



## 보텍스 방식의 비접촉 그리퍼에서 에어 헤드 형상이 파지력과 스월 유동 안정성에 미치는 영향

김준현<sup>a</sup>, 성재용<sup>b\*</sup>

## Influence of Air Head Shape on Lifting Force and Stability of Swirl Flow in a Vortex-Type Non-Contact Gripper

Joon Hyun Kim<sup>a</sup>, Jaeyong Sung<sup>b\*</sup><sup>a</sup> NDT Center, Seoul National University of Science & Technology 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea<sup>b\*</sup> Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received	18	June	2019
Revised	1	August	2019
Accepted	2	August	2019

#### Keywords:

Non-contact gripper  
Bernoulli levitation  
End-effector  
Swirl flow  
Air head  
Lifting force

### ABSTRACT

A vacuum for non-contact gripping can be generated using a circular air head. The present study has numerically investigated the influence of the air head shape on the vacuum lifting force and swirl flow stability in a vortex-type non-contact gripper. The grip stabilities of swirl and lifting force variations were analyzed according to the air head end-effector, head chamber, and inner column sizes. Results show that the maximum lifting force occurs at a gap thickness of about 0.5 mm. Although in general, the longer the tip length, the larger the vacuum pressure that forms, an optimum tip length exists when considering the lifting force stability as a small head height might lead to unstable swirl flow. To enhance the stability of swirl, the installation of an inner column is an acceptable alternative irrespective of the 20 to 30% reduction of lifting force.

## 1. 서론

자동화 시스템은 산업 전분야로 확대되고 있고, 인간노동에 대한 작업 환경 개선, 효율의 극대화와 노동비용의 절감이라는 측면이 매우 중요한 이슈가 되었다. 정밀 작업 공정을 필요로 하는 제조환경에서 자동화시스템의 이송 핸들링을 위한 물체를 파지하는 방식도 매우 다양한 편이다. 새로운 gripper 적용이나 로봇 핸드에 부착되는 부분의 다양한 기능은 단순작업이나 인간이 하는 한계적인 역할에만 그치지 않고 복잡한 산업적 목적에 맞게 진화되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

특히, 한 방향 힘으로 파지하는 기술은 효율성이 높아 반도체,

디스플레이, 태양전지판, 의약품, 식품 등과 같은 분야에서 소형이면서 제품의 표면보호, 청정유지 그리고 대량 생산제조 방법에 맞는 새로운 기술들이 연구되고 있다. 단순히 한 방향으로 파지하는 수준을 넘어서 보다 유연하고 다재다능하며 더 많은 기능을 수행할 수 있는 새로운 영역을 향해 발전되고 있다<sup>[4]</sup>. 현재 Fig. 1처럼 한 방향 파지나 holding을 위해서 자기장, 초음파 및 공압과 같은 여러 방법이 개발되었다<sup>[5-7]</sup>. 이 중에서 간단한 구조와 작동으로 이루어지는 공압식 방법은 안정된 상태를 위해 복잡한 제어를 할 필요가 없는 장점이 있다. Fig. 1(e)와 같이 비접촉으로 이루어지는 파지와 holding의 근간 기술인 베르누이 부상(Bernoulli

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6398

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: jysung@seoultech.ac.kr (Jaeyong Sung).

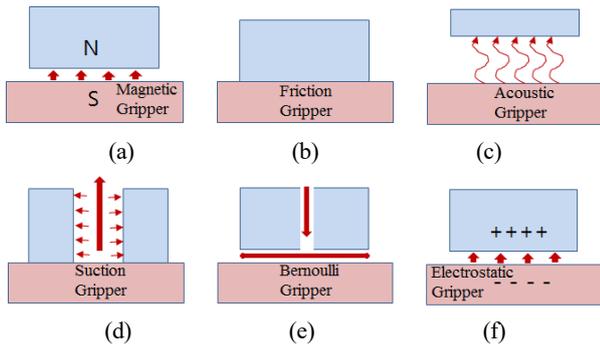


Fig. 1 Typical gripping methods for one directional force

levitation)은 가장 대표적인 공압식 방법이다. 보텍스(vortex) 부상엔 벽면제트(wall jet)를 이용한 공압식 비접촉 핸들링 방법의 또 다른 베르누이 유형이며, 기본 베르누이 부상과 비교하여 공기 소모량이 크다<sup>[8]</sup>. 베르누이 방식과 보텍스 방식은 원통형 구조 내에서 각각 반경방향(radial) 흐름이나 스월(swirl) 흐름을 이용하여 내부 중심 영역에 진공을 발생시켜 대상물체를 들어 올린다. 또한, 주입된 공기가 물체와 헤드 사이의 좁은 영역을 통해 토출 되므로 최소한의 비접촉 공간을 확보하게 된다. 그러나 헤드 크기 및 헤드 내부 end-effector의 구조가 적절한 조건을 갖추지 못하면 파지를 위한 힘의 균형(양압, 자중과 부압 등)이 무너지고 스월 유동의 과도한 비균일 또는 비대칭성이 발생하여 파지 능력을 저하시키는 문제가 발생한다.

유동의 진행 방향에 대한 구조적인 비교에서 보텍스 방식은 주로 하부에서 흐름 방향을 변경시켜 방사형으로만 이루어지는 베르누이 방식보다 부드럽고 적용 영역을 넓히는 부분이 용이하여 흡입력을 키울 수가 있다. 물체의 다양한 모양과 크기에 따라 요구되는 내부 유동 흐름의 제어를 위하여 end-effector 측면에서 최적의 형상 설계와 새로운 유동 방식의 연구가 진행되고 있다<sup>[9,10]</sup>. 대표적으로는 벽면제트를 이용하여 스월 흐름을 발생시키는 방식과 노즐 토출에 의한 반경방향 흐름 방식을 이용하여 진공을 발생시키는 형상 그리고 진공 영역으로 역류(reverse) 되지 않고 토출되도록 하는 end-effector의 개선내용들이 제안되었다. 그러나 여전히 다양한 형태의 물체를 정밀하게 비접촉 파지하기에는 한계점이 있다.

본 연구에서는 이를 극복하고자 보텍스 방식의 비접촉 그리퍼(gripper)에 대해 에어 헤드 형상이 파지력과 헤드 내부 스월 유동의 안정성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 수치해석적 방법으로 헤드 직경 60 mm를 기준으로 보텍스 헤드 하단의 end-effector를 구성하는 팁(tip) 모양과 크기에 의한 영향을 우선적으로 살펴본다. 또한, 챔버 내부 형상 설계 인자에 따른 스월 유동 특성을 살펴보고, 내부 column의 존재에 따른 스월 유동의 안정성에 대해 논의한다.

## 2. 한 방향 gripping을 위한 기술적 접근 원리

유용한 파지 방식 및 힘의 크기 선정은 대상물의 물리적 특성(재료, 질량, 표면 재질, 크기, 힘의 전달 방향 등)에 의해 영향을 받는다. 특정 속성을 가진 대상물에 대하여 각각 합당한 물리적 원리에 기반 하는 파지 모드를 선택할 수 있다.

### 2.1 밀폐형 suction에 의한 접촉 파지

진공 흡착에 의한 한 방향 파지 방법이 널리 사용되는 원리이다. 다양한 형태의 재료와 크기에 대응 가능한 end-effector가 용이하게 적용된다. 새로운 공기가 유입되지 않는 환경을 가지지 않기 때문에 파지 힘이 다른 경우에 비하여 크다. 이 시스템에서는 다양한 재료에 따른 재료의 표면에 대하여 기술적인 제한 요소가 많지 않아 end-effector의 형상 대응도 가능하고, 또한 어댑터의 각도 스윙(angular swing)에 의한 유연한 마운트에 의해 해결도 가능하다. 예로 원뿔 모양의 고무 주름으로 둘러싸여 있는 형태는 표면의 변화가 있는 부분까지 유연하게 파지가 이루어진다. 진공에 따라 일정 크기에 대하여 파지도 수행할 수 있으며 금속, 비금속 등 재료의 제한도 거의 없다. 여기에 적용되는 진공을 얻기 위해서는 벤츄리(venturi) 원리의 이젝터(ejector) 또는 진공 펌프를 사용한다. 이 방식으로 초소형 이젝터 같은 경우에도 밀폐된 환경에서는 50 kPa 이상의 진공을 확보하는 것이 가능하다.

### 2.2 베르누이 부상에 의한 비접촉 파지

공기 흐름 속도를 변경하여 제트(jet) 출구에서 압력이 변할 때 나타나는 베르누이 원리에 기반 하는 것과 회전 운동을 이용하여 스월 흐름을 발생시켜 진공을 얻어내는 방식들이 이에 해당된다. 후자인 보텍스 방식은 Fig. 2처럼 챔버 본체에 들어가는 압축 공기가 특수 구조의 채널에서 회전 링으로 향하게 되어 대상 표면과 챔버 벽 사이의 틈새에 밀봉 효과가 생기며 동시에 진공 원으로

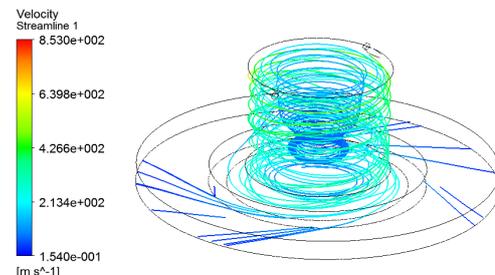


Fig. 2 Streamlines in a cylindrical chamber (head inner diameter 40 mm, head inner height 30 mm) with the working pressure 4 bar and air inlet diameter 2 mm of tangential direction

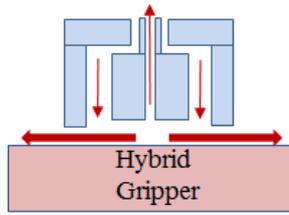


Fig. 3 Conceptual hybrid gripper to build both suction function and gap flow for non-contact region

기능하는 사이클론 콘이 생성된다. 이 경우 주입되는 공기량만큼 토출되어야 하므로 하부 공간 틈새가 발생한다. 이러한 비접촉 파지 방식은 석션(suction) 방식에 비해 힘은 약하지만 end-effector의 최적 설계가 이루어지면 안정적인 파지가 가능하다.

### 2.3 Suction과 베르누이형 혼합 방식의 비접촉 파지

Fig. 3은 석션 기능과 베르누이형 (또는 보텍스형) 기체 흐름을 동시에 갖는 혼합형으로 구성하는 형태이다. 앞서 언급한 각 방식이 가지는 장점을 최대한 활용하는 방식이다. 진공이 필요한 부분을 개별적으로 줄 수 있으며, 이와 함께 고른 진공 분포가 가능하다. 비접촉을 위한 채널 기능을 부여하기 위해 설계되는 복잡한 내부 구조에 따라 다양한 적용도 가능하다. 따라서 물체의 크기나 비접촉으로 파지할 수 있는 힘의 한계뿐만 아니라 적용 대상의 범위도 어느 정도 확대 할 수 있다.

현재 이러한 방식의 소형물 적용 연구 사례<sup>[11]</sup>에서는 아직 미미한 수준이지만 파지 가능성과 비접촉이라는 장점을 동시에 가지고 있다. 또한 재료의 강성과 표면 모양에 따라 나타나는 비균일성에 대한 난제에 대한 해법도 가능하다. 현재는 여러 가지 기술적 한계로 인해 물체 상부에서 비접촉 파지하는 방식이 아닌 하부에서 공기 분사를 통해 물체를 부양시키는 기술이 적용되고 있다<sup>[12]</sup>. 이는 평판 아래에서 다수의 노즐을 통해 이루어지는 분사방식으로 박판의 자중에 의한 처짐을 균형 있게 떠올려 주는 방법이다. 향후 충분한 기술적 기반이 확보된다면 혼합 방식의 비접촉 파지 기술이 연성 대형평판(flexible large flat sheet)으로 확대 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 해석 모델과 방법

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 원형 헤드 내부에서 진공을 발생시키고 물체와 헤드 사이에 비접촉 gap 유지를 위해 일정량의 공기를 통과시키는 보텍스 방식의 헤드 구조를 채택하였다. 헤드 내부 측면으로 향하는 두 개의 주입구가 있으며, 원통 내 스월 흐름의 원활한 토출을 돕기 위해 하부에 팁 영역(tip zone)과 45° 챔퍼(chamfer)를 갖는 형태이다. 여기에 추가적으로 Fig. 4(b)와 같이

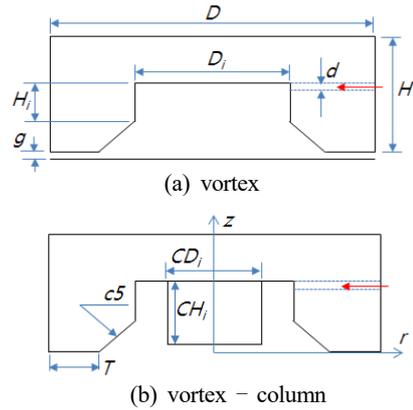


Fig. 4 Schematic of the vortex-type non-contact gripper

내부 챔버 안에 column이 조립되는 모양이다. 좌표계의 원점은 에어 헤드의 중심축 바닥으로 설정하였고, 공기가 토출되는 비접촉 gap 부분은 높이(z)가 음수이다. 한 방향 파지를 위해 헤드 내부와 하부 end-effector 구조의 특성에 따라 나타나는 성능을 분석하기 위해 Table 1에 해석 모델의 설계 인자 및 조건을 정리하였다. 헤드 내부 지름과 내부 높이의 변화에 의한 스월 크기, 그리고 하부 end-effector에 해당되는 팁 길이, 챔퍼 크기, column의 존재 유무에 따른 파지 힘의 변동과 안정성(stability)의 측면에서 그 결과를 고찰한다.

해석을 위해 사용되는 계산 도구는 범용 프로그램인 CFX이며 해석 조건은 정상상태(steady-state)로 가정하였다. 유동 흐름의 계산영역은 좁은 관 통로를 통하여 헤드 내부로 주입되는 부분에서 시작하여 내부 원통 구조를 따라 거동을 하게 되며, 최종적으로 하단 팁과 평판 표면 사이의 공간 사이를 거쳐서 헤드 외부로 토출된다. 토출된 이후 공기 유동은 일정범위까지 하부 평판 위를 따라 흐른다.

End-effector를 갖는 헤드의 내부 단면은 Fig. 5(a)에 도시하였다. 접선 흐름을 가지는 2 mm 직경의 2개 주입구가 상단부에 위치하고 하단 팁 아래로 원활하게 토출되도록 챔퍼 크기를 5 mm로 하였다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 헤드 형상 모델링에서 고체(solid)

Table 1 Head design parameters

Size name (symbol)	value (unit, mm)
Head outer diameter ( $D$ )	60
Head inner diameter ( $D_i$ )	20, 30, 40
Head outer height ( $H$ )	30, 45
Head inner height ( $H_i$ )	15, 30
Tip length ( $T$ )	2, 5, 10
Column diameter ( $CD_i$ )	20, 30
Column height ( $CH_i$ )	20, 30
Chamfer ( $c$ )	5
Air inlet diameter ( $d$ )	2
Gap thickness ( $g$ )	0.3 - 1.2

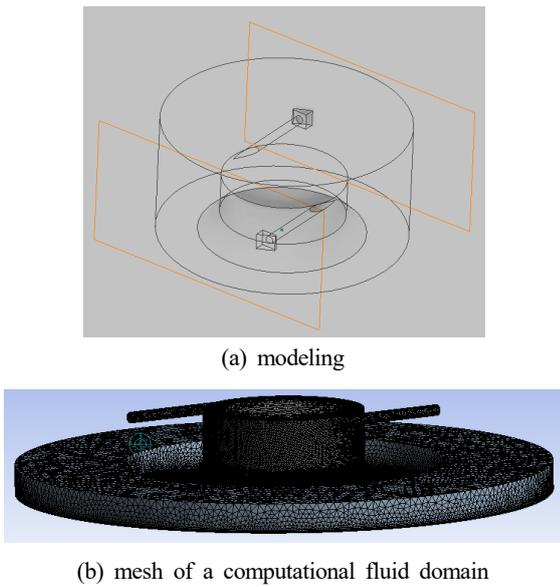


Fig. 5 A CFX modeling for the vortex-type air head

부분을 제거한 유동 계산 영역의 격자를 보여주고 있다. 공기가 헤드 하단의 미세한 틈새를 통해 대기 중으로 토출되므로 외부 공간을 포함하여 계산 영역을 직경 100 mm로 확대하였다. 겹을 통해 나오는 유동은 노즐 분사처럼 수평 방사형으로 진행되면서 소멸된다.

이를 고려하여 계산영역은 직경 2배 수준으로 적용했으며 실제 토출 되면 금방 대기압 수준으로 떨어지기 때문에 토출 이후 파지 대상물 표면에 미치는 부분에 큰 영향력은 없다.

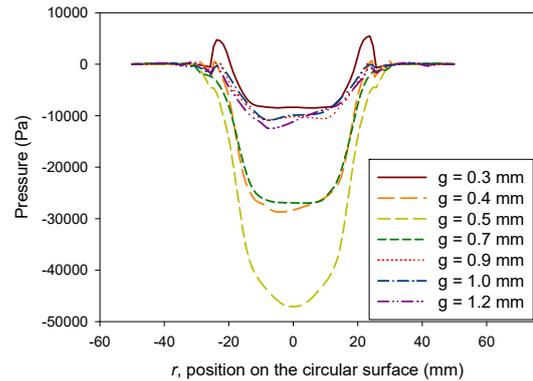
팁 하단 좁은 영역에서 급격하게 변하는 물리적 변화량을 고려하여 헤드 내부와 출구 주변은 비균등 간격 격자를 사용하여 매우 조밀하게 설정했다. 그리고 헤드 내부 벽면과 하부 end-effector, 가공물의 표면 주위는 격자 생성 시 inflation 기법을 적용하였다. 형상 조건에 따라 격자수의 차이가 약간 있으나 전체적인 평균 격자수는 약 3백만 개이다. 계산의 수렴 조건은  $10^{-4}$ 으로 설정하였다.

Table 2는 사용된 유동 및 경계조건을 나타낸다. 작동 유체는 25°C 공기이며, 난류 모델은 k-epsilon 모델을 사용하였다. 주입구(inlet)는 압력 경계조건으로 4 bar의 정압(static pressure) 조건을 설정하였고, 벽면은 점착조건을 사용하였다. 최외각 옆면은 outlet으로 면적 평균 압력값이 대기압 0 Pa이 되도록 설정하였다. 토출 지역 상부면은 opening으로 개방 압력 및 방향 조건을 사용하였는데, 이는 유동 방향이 계산 영역에 있을 때의 압력 값은 정상적인 속도 성분을 기반으로 하는 총 압력(total pressure)이 되고, 유동 방향이 계산 영역을 떠날 때는 정압이 0 Pa이 되도록 하는 기법이다.

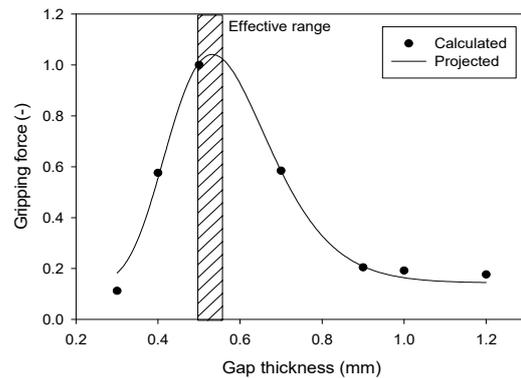
Fig. 6은 Fig. 4(a)의 보텍스 방식에 대해서 평판 위에 분포되는 압력과 파지력 또는 밀어내는 힘의 변화 추이를 gap 두께에 따라

Table 2 Flow model and boundary conditions

Parameters	Conditions
Working fluid	25°C air
Turbulence model	$\kappa$ - $\epsilon$ model
Inlet	Static pressure
Outlet	Average static pressure
Opening	Opening pressure and direction
Wall	No slip condition



(a) pressure profile



(b) non-dimensional lifting force

Fig. 6 Pressure distribution on a plane plate and lifting force acting on the plane with respect to gap variation. ( $D_i = 40$  mm,  $H_i = 30$  mm,  $T = 5$  mm,  $c = 5$  mm)

나타내고 있다. 헤드 내부 높이( $H_i$ )는 30 mm, 내부 직경( $D_i$ )은 40 mm, 팁 길이( $T$ )는 5 mm로 고정하고, gap 두께( $g$ )를 0.3 mm에서 1.2 mm로 변화시켜 그 영향을 고찰하였다. Fig. 6(a)에서 하부 원형 평판위에 작용하는 압력의 분포는 gap 두께가 0.5 mm 일 때 최대 진공압이 발생하였다. 이보다 작은 0.3 mm gap 두께에서는 좁아진 토출 면에서 압력 구배가 작아지고 챔퍼 아래에 와류가 형성되어 전체적으로 물체 표면의 진공압이 줄어든다. gap 두께가 0.9 mm 이상으로 커지면 토출면의 유로가 넓어지면서 유속이 줄어들고 베르누이 원리에 의해 진공압이 줄어든다. Fig. 6(b)는 gap 두께에 따른 원형 판(100 mm 직경)에 미치는 파지 힘의 변화를 보여주고 있다. 계산된 파지힘을 gap 두께 0.5 mm 경우의

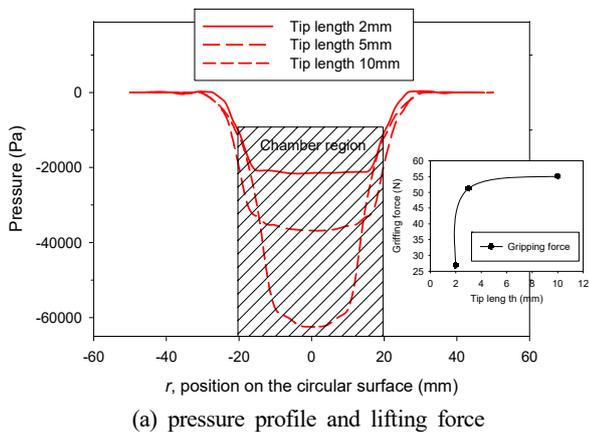
파지힘(50.7 N)으로 무차원화하고 데이터를 curve fit하여 표시하였다. 그 결과, gap 두께가 0.55 mm인 경우를 정점으로 대칭형에 가깝게 파지력이 저하되는 결과가 나타났다. 즉, 보텍스 방식에서는 토출구 및 재순환 구역의 경계 부근에서 빠른 혼입을 이루는 최적의 조건이 gap 두께가 0.5~0.55 mm 부근이라는 것을 의미한다.

#### 4. 결과 및 고찰

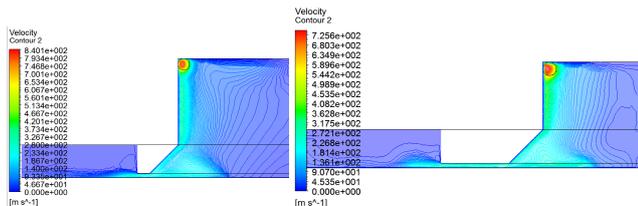
##### 4.1 보텍스 헤드 하단의 end-effector 형상에 따른 영향

상용 기술적 데이터<sup>[13]</sup>에 의하면 5 bar 압축공기를 헤드 직경  $D = 20$  mm에 적용하면 약 0.9 N의 파지력이 생기고, 직경 60 mm 헤드에 적용하면 6 N의 안정적인 파지력이 생긴다고 알려져 있다. 본 연구에서는 이를 참고하여 헤드의 기준 직경을 60 mm로 하고 4 bar 공기압을 적용하였다.

Fig. 7은 팁 하단부 길이 변화에 따른 파지 대상물 표면에 작용하는 압력분포(파지력 포함)와 수직 단면의 속도분포이다. 보텍스 헤드 하부 토출 방사형 채널 길이에 의해 스월 기류가 만들어내는 유동이 파지에 미치는 영향을 검토하고자 팁 하단부 길이를 2, 5, 10 mm로 변화시켰다. 그 외 설계 인자로 헤드 내부 직경은 40 mm, 챔퍼 크기는 5 mm, 헤드 내부 높이는 15 mm, gap 두께는



(a) pressure profile and lifting force



(b) velocity contours (by  $T = 2$  mm and  $T = 10$  mm)

Fig. 7 Pressure distribution on a circular plate and velocity contour at vertical head section. ( $D_i = 40$  mm,  $H_i = 15$  mm,  $g = 0.7$  mm,  $c = 5$  mm)

0.7 mm, 입구 압력은 4 bar로 고정하였다. 이 그림에서 팁 길이가 2 mm인 경우 토출구 가깝게 형성되는 스월 순환 지역의 경계 부근으로부터 빠른 혼입이 이루어지면서 진공의 균일도면에서는 개선이 있으나 파지력에서는 5 mm 경우보다 1/2 수준으로 떨어졌다. 팁 길이가 5 mm인 경우는 진공의 분포도나 파지력에서 있어서 최적에 가까운 결과를 보여준다. 대체로 45° 챔퍼 상단 모서리에서 시작하여 축 중심 방향으로 확산되는 스월 움직임은 팁 길이가 길수록(10 mm 경우) 스월 순환 지역이 토출구에서 중심축 방향으로 약간 이동되어 전체적으로 하부 진공 영역은 좁아지고 진공압은 커진다.

##### 4.2 헤드 챔버 내부 형상에 따른 스월 유동의 영향

헤드 내부의 스월 흐름은 비대칭(asymmetric) 형태로 존재하며, 원심력을 바탕으로 하는 보텍스 유동으로 나타난다. 일반적으로 스월 흐름은 집중와류(concentrated vortex), 강제와류(solid-like vortex), 벽면제트와류(wall jet vortex)로 분류된다<sup>[14]</sup>. 본 연구는 벽면제트와류에 해당되며, 스월 패턴은 챔버 내부 형상에 따라 달라진다.

Fig. 8에서는 헤드 측벽을 향하여 제트가 분사되어 내부 높이별로 나타나는 원주 방향 속도를 반경방향 위치에 따라 나타내었다. 여기서 주입구 직경 2 mm, 헤드 내부 높이는 30 mm, 내부 직경 40 mm, 팁 길이 5 mm, 챔퍼 크기 5 mm, gap 두께는 0.5 mm로 하여 계산하였다. 스월 속도는 원심력의 크기를 나타내며, 벽면을 따라 분사되는 제트에 의해 원통형 챔버의 벽면 근처에서 큰 스월 속도가 나타나 챔버 중심부에는 원기둥 모양의 공동(cavity)이 생긴다. 그러나 스월 유동이 헤드 하부 end-effector의 챔퍼 영역 ( $0 < z < 5$  mm)에 들어가면서 스월 흐름이 약해짐을 알 수 있다.

스월 크기는 각운동량과 축방향 운동량으로 구성된 무차원수로 스월 운동에 큰 영향을 주는 tangential wall shear stress와 관계

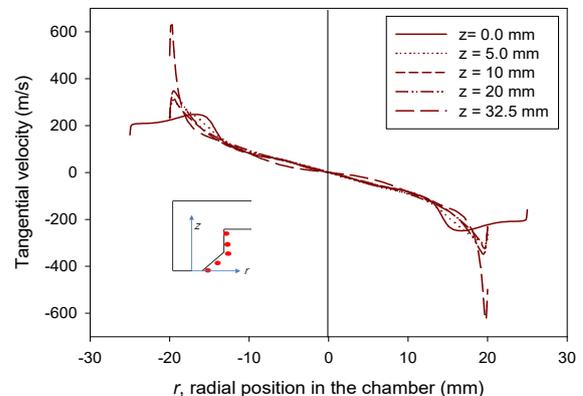
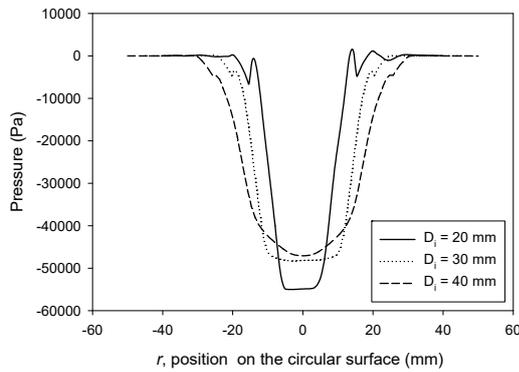


Fig. 8 Swirl velocity profile generated by wall jet at different horizontal height inside head chamber. ( $D_i = 40$  mm,  $H_i = 30$  mm,  $g = 0.5$  mm,  $c = 5$  mm)

**Table 3** Lifting force at different head inner size

Inner size	Calculated gripping force	Ratio to max force
$D_i = 20$ mm	16.94 N	0.334
$D_i = 30$ mm	32.6 N	0.643
$D_i = 40$ mm	50.69 N	1

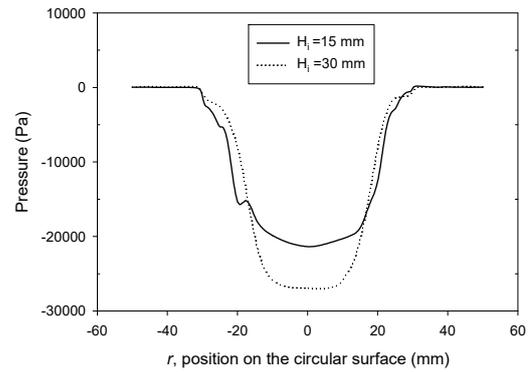


**Fig. 9** Pressure distribution on a plane plate at different inner head diameter. ( $H_i = 30$  mm,  $T = 5$  mm,  $g = 0.5$  mm,  $c = 5$  mm)

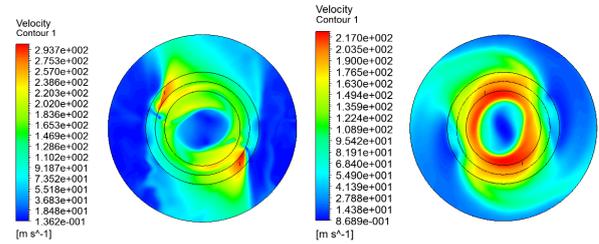
된다<sup>[15]</sup>. 챔버 내부직경이 변하면 벽면 제트가 축방향 속도와 스월 속도에 미치는 영향이 다르게 나타나기 때문에 스월 크기 변화가 일어나게 된다. 스월 크기가 파지력에 미치는 경향을 분석하기 위해 헤드 챔버 직경의 크기를 20, 30, 40 mm로 변화시켜 그 영향을 Fig. 9에서 살펴보았다. 작동 공기압은 4 bar, 주입구 직경은 2 mm로 하고 팁 하부 토출 이후 extension 길이를 20 mm로 동일하였다.

내부 챔버 직경 크기가 40 mm에서 3/4 및 1/2로 축소되면서 동일한 유량을 주입하더라도 챔버 측벽을 따라 진행되는 스월 흐름에서 축 방향 속도는 커지고 스월 속도는 줄어든다. 경계지역에서의 유입이 더 빠르게 이루어지면서 진공 영역의 강도는 더 높아졌다. 이것은 축 방향의 속도증가로 인한 것이기 때문에 헤드 측벽으로 향하는 반경 방향 압력 구배도 증가하기 때문이다. 내부 직경이 줄어들면 전체적인 유동 영역의 축소와 함께 진공 형성면적은 작아지기 때문에 파지력도 낮아졌다. Table 3에서 샘플 원형 표면에 적용하는 진공압력에 의한 수직 방향 파지력의 계산 결과로 헤드 내부 직경이 40 mm에서 30 mm, 20 mm로 1/4만큼씩 줄어들 때마다 파지력도 1/3 비율만큼 줄어들었다.

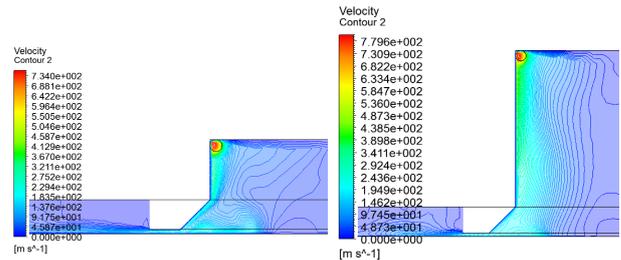
앞에서 스월 크기는 파지에 영향을 주며, 헤드의 직경 크기에 의존함을 살펴보았다. 여기서 또 다른 변수는 헤드 높이( $H_i$ )이다. 헤드의 높이가 스월 크기에 미치는 영향을 살펴보고자 챔버 직경을 40 mm로 고정하고, 헤드 높이를 15 mm, 30 mm로 변화시켜 그 영향을 Fig. 10에 나타내었다. 헤드 높이에 따른 압력 분포를 Fig. 10(a)에서 비교하였다. 헤드 높이가 15 mm 경우, 압력 분포



(a) Pressure distribution



(b) Velocity contour at  $z = -0.35$  mm of gap region (for  $H_i = 15, 30$  mm from the left)



(c) Velocity contours (for  $H_i = 15, 30$  mm from the left)

**Fig. 10** Pressure distribution on a circular plane surface, and horizontal & vertical velocity contours at different inner head chamber height. ( $D_i = 40$  mm,  $T = 5$  mm,  $g = 0.5$  mm,  $c = 5$  mm)

가 중심축을 기준으로 좌우 비대칭 형태가 나타났다. 이는 스월 작용에 의한 유체의 유입이 상대적으로 충분하지 못하여 회전방향으로 불균일한 순환 흐름이 발생한 결과이다. Fig. 10(b)-(c)의 속도분포에서 이러한 현상을 뚜렷이 볼 수 있으며, 헤드 하단부 아래  $z = -0.35$  위치(토출되는 위치)에서의 수평 평면과 수직 평면에서 나타나는 속도 분포를 보면 주입구 위치 아래로 접선 방향 토출이 주로 2 방향 위주로 비대칭 형태가 이루어졌다. 챔버 위치에서는 헤드 높이 15 mm인 경우 빠른 속도가 집중된 모습이 보이고, 30 mm인 경우는 좀더 고르게 분포된 모습을 보인다. 특히 Fig. 10(c)의 수직 단면 속도 분포에서 헤드 높이 15 mm 경우 매우 얇은 스월 속도 영역을 가지고 충분한 스월 움직임이 없이 진행하다가 토출구 지역에서 순환을 크게 하고 있다.

스월 크기는 축방향 속도와 스월 속도 사이의 상호작용 (interaction)에 의해 결정되는데, 스월 속도가 축 방향 속도보다 클수록 스월 크기가 커진다. 그러나 벽면 제트 주입 부분에서 주입 각이나 주입속도에 의해 노즐 분사 영역 근처에서의 흐름이 챔버 내부 스월 흐름과 중첩되면 축 방향 속도의 순간적인 상승이 유발되어 스월의 불안정성이 증폭될 수 있다. 이와 같은 이유로 헤드의 설계상 안정적인 보텍스 유동을 가지기 위해서는 헤드의 직경 크기에 적합한  $H_i$ 의 높이가 필요하다.

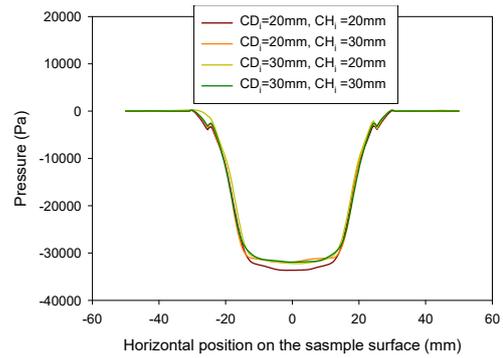
### 4.3 챔버 내 Column 설치에 따른 스월 흐름의 안정화

원통형 챔버 내에서 보텍스 방식의 편향된 원심력에 의해 구동되는 축 대칭 스월 흐름이 접선과 축 방향 속도가 크게 변화하는 경계층으로 둘러싸여 있다. 이러한 속도 구배를 가진 해당 층은 주입 조건에 따라 스월에 불안정성이 발생할 가능성이 있다. 초기 상태에서 불안정성은 접선 및 축 방향으로 정렬되는 회전 흐름의 진행에 주기적이면서 국부적으로 영향을 미친다. 최종 토출 시에도 원심력에 의한 기체 흐름의 균일성이 저하될 수 있다. 이를 개선하기 위한 방안으로 챔버 내에 column을 두어 스월 흐름의 안정성을 확보하고자 하였으며, 챔버 직경 40 mm, 챔버 높이 30 mm, 팁 길이 5 mm, gap 두께 0.5 mm인 보텍스 헤드 내부에 Fig. 4(b)와 같은 column을 설치하였다. Column 높이( $CH_i$ )와 직경( $CD_i$ )을 모두 20 mm와 30 mm로 2가지씩 총 4가지로 변경하여 그 영향을 고찰하였다.

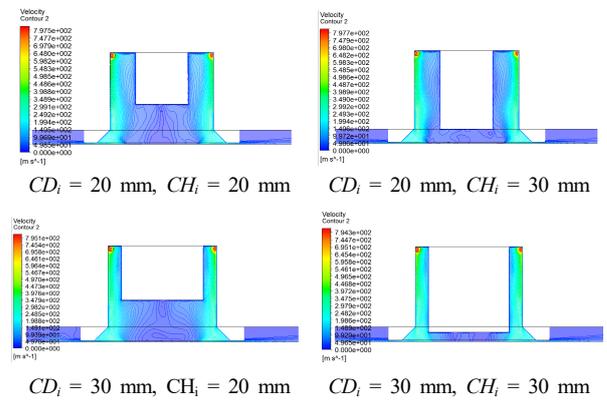
Fig. 11은 4가지 다른 column이 존재하는 경우에 대해 압력 분포 및 유동장을 보여주고 있다. Fig. 11(a)에서 대상 표면에 작용하는 압력 분포를 보면 4 가지 경우 모두 거의 비슷하다. 이는 스월 흐름이 잘 유지되어 진공 영역을 충분히 확보한 결과이다. Fig. 11(b)에서는 수직단면의 속도분포를 보여주고 있으며, column의 존재에 의해 바깥쪽으로 선회하는 스월이 중심부로 침투되는 현상이 줄어들고 스월이 안정화되는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 11(c)의 수평단면에서의 속도분포를 통해서도 확인할 수 있으며, 수평단면 유동이 단면 위치에 상관없이 대체로 고른 흐름을 보인다. 안정적인 스월은 반경방향의 속도분포만 가지고 회전방향으로는 변화가 없어야 한다.

Column이 없는 Fig. 10(b)의 수평단면 속도분포에서는 2곳에서 주입되는 벽면제트가 챔버 중심부까지 침투하여 스월이 불안정해지고 토출 시 압력의 불균일 현상을 유발하였다. Table 4에서는 column의 크기에 따른 파지력의 변화를 column이 없는 경우와 비교하였다.

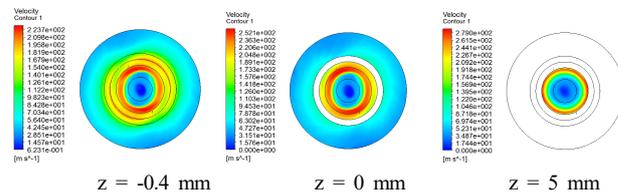
Column을 설치하면 전체적으로 파지력이 20 ~ 30% 감소하였다. 이는 column의 존재로 인해 챔버 중심부의 강한 진공이 줄어들었기 때문이다. 파지력의 감소는 column 직경과 높이가 커질수



(a)



(b)



(c)

**Fig. 11 Overview of swirling flow assisted by different columnar bars in a cylindrical chamber. (a) pressure distribution on the sample plane; (b) contours of velocity on the y-z plane; (c) contours of velocity on the x-y plane at a column ( $CD_i = 20$  mm and  $CH_i = 20$  mm). ( $D_i = 40$  mm,  $H_i = 30$  mm,  $T = 5$  mm,  $g = 0.5$  mm,  $c = 5$  mm)**

**Table 4 Lifting force at different column size**

Inner column size (mm)	Lifting force
$CD_i = 20, CH_i = 20$	40.479 N
$CD_i = 20, CH_i = 30$	39.766 N
$CD_i = 30, CH_i = 20$	36.536 N
$CD_i = 30, CH_i = 30$	37.199 N
No column	50.69 N

록 더 크게 나타났다. 파지력의 감소는 불가피하지만 내부 column은 훨씬 개선된 스월 흐름을 가지게 하여 유연하고 안정적인 파지가 가능하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 보텍스 방식 비접촉 그리퍼에 적용되는 에어 헤드형상에 따른 파지력과 스월 유동의 안정성에 대해 수치해석적 기법으로 고찰하였다. 에어 헤드 형상에서 주입 공기량만큼 효율적으로 토출 시 빠져 나가는 비접촉 공간을 확보하기 위한 end-effector와 헤드 챔버 공간적 형상을 변화시켰고, 챔버 내부에 column을 형성하여 스월 유동의 안정화 특성을 고찰하였다.

End-effector의 영향으로서 gap 두께가 0.5 mm 근처에서 가장 큰 파지력이 나타났고, 팁 길이는 길수록 진공압이 커졌으나 진공압 분포의 균일도 측면에서는 팁 길이 5 mm가 최적이다.

스월 크기는 파지에 영향을 주며, 헤드 챔버의 직경이 커질수록 스월 크기가 커지고 파지력이 증가한다. 헤드 챔버의 높이는 스월의 안정성에 영향을 주며, 챔버가 충분히 높으면 스월이 안정되어 진공압의 분포가 균일한데 반해 챔버 높이가 낮으면 토출구 근처 챔퍼 부분에서 2차 와류가 발생하여 압력분포의 균일도가 떨어진다.

불안정한 스월 흐름을 개선하고자 챔버 내부에 column을 추가하여 고찰한 결과, 약 20 ~ 30%의 파지력 저하가 있었으나 훨씬 개선된 스월 흐름을 얻을 수 있었고 안정적인 파지가 가능함을 확인하였다. 내부 column의 직경과 높이가 커질수록 파지력의 감소는 커지므로 적절한 column 크기의 선정이 필요하다.

End-effector부와 이와 연동된 column 구성으로 도출된 비접촉 헤드 사양은 안정된 유동을 필요로 하는 연성 박판의 파지를 위한 혼합형 비접촉 파지설계의 기술적 자료로 활용될 수 있다.

## 후 기

이 연구는 2019년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2019R1F1A1056931).

## References

[1] Nakazawa, N., Kim, I-h., Inooka, H., Ikeura, R., 2001, Force Control of a Robot Gripper Based on Human Grasping Schemes, Control Engineering Practice, 9:7 735-742.  
 [2] Pham, D. T., Tacgin, E., 1992, GRIPPEX: A Hybrid Expert System for Selecting Robot Gripper Types, Int. J. Mach. Tools Manufact., 32:3 349-360.  
 [3] Fantoni, G., Santochi, M., Dini, G., Tracht, K., Scholz-Reiter, B., Fleischer, J., Lien, T. K., Seliger, G., Reinhart, G., Franke, J., Hansen, H. N., Verl, A., 2014, Grasping Devices And Methods in Automated Production Processes, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 63:2 679-701.

[4] Fantoni, G., Capiferri, S., Tilli, J., 2014, Method for Supporting the Selection of Robot Grippers, Procedia CIRP, 21 330-335.  
 [5] Sakiv, V., Mykhailyshyn, R., Dunchon, F., 2019, Gasdynamic Analysis of the Bernoulli Grippers Interaction with the Surface of Flat Objects with Displacement of the Center of Mass, Vacuum, 159 524-533.  
 [6] Rhim, W-K., Ohsaka, K., Paradis, P-F., 1999, Noncontact Technique for Measuring Surface Tension and Viscosity of Molten Materials using High Temperature Electrostatic Levitation, Review of Scientific Instruments, 70:6 2796-2801.  
 [7] Li, X., Kagawa, T., 2013, Development of a New Noncontact Gripper using Swirl Vanes, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29:1 63-70.  
 [8] Kim, J. H., Kim, Y. G., Ahn, S. W., Kim, Y. S., 2013, Design of Non-Contact Pick-Up Head for Carrying Large Flat Sheets, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 22:6 937-944, <http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.6.937>.  
 [9] Kim J. H., Lee, S-J., 2015, Configuration of Noncontact Grip System for Carrying Large Flat Sheets using Vacuum Air Heads, Journal of Tribology, 137:4 041103.  
 [10] Burn, X. F., Melkote, S. N., 2009, Modeling and Prediction of the Flow, Pressure, and Holding Force Generated by a Bernoulli Handling Device, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 131:3 031018.  
 [11] Sam, R., Nefti, S., 2011, A Novel, Flexible and Multi-Functional Handling Device Based on Bernoulli Principle, IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), 166-171.  
 [12] Lee, T. G., Yu, J. S., Jung, H. J., Kim, J-H., Kim, J. H., 2013, Development of the Air Floating Conveyor System for the Large Glass Sheet, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 22:4 635-642, [Http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.4.635](http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.4.635).  
 [13] FiPA, viewed 21 April 2019, Special Vacuum Cups - Bernoulli Vacuum Cups - Series SX-B, Notes <<http://www.fipa.com>>.  
 [14] Ishimoto, J., Hoshina, H., Tsuchiyama, T., Watanabe, H., Haga, A., Sato, F., 2007, Integrated Simulation of the Atomization Process of a Liquid Jet through a Cylindrical Nozzle, Interdisciplinary Information Sciences, 13:1 7-16.  
 [15] Wang, Y., Yang, V., 2018, Central Recirculation Zones and Instability Waves in Internal Swirling Flows with an Annular Entry, Physics of Fluids, 30:1 013602.