

## 형상 변화에 따른 볼텍스 컵 최적화를 위한 전산유동해석

김 중 희\* · 손 창 현\*\*

\* 경북대학교 기계공학부

### Computational Fluid Analysis for Optimization of Vortex Cup with Different Shape

Joong Hui Kim\* and Chang Hyun Sohn\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received February 3, 2014 ; Revised May 14, 2014 ; Accepted June 11, 2014)

**Key Words:** Vortex Cup(볼텍스 컵), Vortex Levitation(볼텍스 부상), CFD(전산유동해석), Non-Contact Handling(비접촉 처리)

**초록:** 볼텍스 컵은 실리콘 웨이퍼 제조공정과 같이 민감한 물체를 이송시키는 방법으로 제안되었다. 볼텍스 컵의 상부에 위치한 노즐을 통해 공기를 공급하면 내부 실린더에서 큰 선회유동이 생성된다. 공기는 볼텍스 컵과 바닥면 사이의 틈새로 빠져나가면서 흡입압력을 생성시키고 물체를 들어 올릴 수 있게 된다. 본 논문에서는 볼텍스 컵에 관한 3차원 유동 해석을 통해 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 해석의 신뢰성을 확인하였다. 그리고 볼텍스 컵의 길이 변화와 형상 변화를 주어 해석을 통해 흡입 압력 생성에 영향을 미치는 정도를 분석하였고, 볼텍스 컵 형상의 최적 조건을 제시하였다.

**Abstract:** The vortex cup is proposed as a method to transport sensitive products such as silicon wafers in manufacturing. Air through the inlet nozzle located at the top of the vortex cup flows to form a swirl in the cylinder. The flow located in the lower part of the thin gap between the vortex cup and the bottom surface escapes and generates a negative pressure that can lift objects. In this research, three-dimensional numerical simulation of the air flow field in a vortex cup is performed, and a comparison of the simulation and experimental results shows very good agreement. In addition, the vortex cup length and shape that affect the negative pressure were applied to the analysis. Through the simulation results, optimum conditions for the vortex cup shape were proposed.

#### - 기호설명 -

- H1 : 볼텍스 컵의 높이
- H2 : 볼텍스 컵 디퓨저의 높이
- D1 : 볼텍스 컵의 직경
- D2 : 볼텍스 컵 목의 직경
- gap : 볼텍스 컵과 바닥면 사이의 틈새

#### 1. 서론

반도체 산업에서 반도체 웨이퍼를 이송하는 것

은 매우 까다롭다. 사람의 손이나 기계를 이용한 접촉 처리 방식을 채택할 경우 10 μm ~ 10mm의 사용 불가능한 부분이 필연적으로 발생하게 되어 실리콘 웨이퍼의 품질을 저하시키는 요인이 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 안정적이면서 비접촉식 이송 방법의 필요성이 대두되어 지속적으로 연구되어왔다.<sup>(1)</sup>

이전의 비접촉으로 물체를 이송하는 방식으로는 전자기와 공기를 사용한 방식 등이 있다. 전자기에 의한 방식은 물질의 전자기 특성에 크게 의존하는 성향과 실리콘 웨이퍼를 자화시킬 가능성이 있어 부적합한 이송 방식으로 여겨진다. 공기를 사용한 에어쿠션 방법은 중력과 반대 방향으로 흐르는 압축 공기를 이용한 것으로 물체의

† Corresponding Author, [yykim@snu.ac.kr](mailto:yykim@snu.ac.kr)  
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

무게와 분사된 공기 압력이 평행을 이루어 물체를 띄우는 방식이다. 물질의 특성이나 크기에 제약이 없고 열 발생이 미약하다는 이점이 있지만 많은 양의 공기 유입과 물체 부양에 따른 불안정성의 문제점을 가지고 있다. 베르누이정리에 따라 유동 단면 감소에 의한 유속의 증가는 정압을 낮출 수 있고 이 낮은 정압을 이용한 물체 부양 방법은 얇게 쓴 과일 등의 이송에 사용되고 비교적 작고 가벼운 물체에 적용이 되었다.<sup>(2)</sup>

최근 Fig. 1과 같은 실린더 형태의 볼텍스 컵 내부에 접선방향의 압축공기를 분사하여 큰 선회 속도를 가진 볼텍스를 형성하여 안정적인 흡입압력을 형성하는 연구가 여러 연구자들에 의해 진행되었다.<sup>(3)</sup> 원형실린더 내부에 선회 속도를 생성하면 이론적으로 중심부위에 선회속도의 제공에 비례하는 가장 낮은 압력이 생성되고 반경의 제공에 비례하여 증가하는 포물선 형태의 압력분포가 생성된다.<sup>(4)</sup>

Ma 등<sup>(3)</sup>은 Fig. 1의  $H_1=8.5\text{mm}$ ,  $H_2=2\text{mm}$ ,  $R_1=6.5\text{mm}$ ,  $R_2=8.5\text{mm}$ ,  $R_3=9\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $L=5.3\text{mm}$ 의 볼텍스 컵의 형상을 이용하여 부양력을 체계적으로 실험하여, 질량유량변화와 바닥면과 볼텍스 컵 사이의 틈새에 따른 볼텍스 컵 하부 면에 생성되는 흡입 압력을 측정하였다.

Ma 등<sup>(3)</sup>은 Li 등<sup>(5)</sup>이 실험한 동일 형상에 3-D 모델링을 통하여 질량유량 그리고 바닥 면과 볼텍스 컵 사이의 간격에 따라 하부 면에 생성되는 흡입 압력을 수치 해석적 방법으로 연구하여 볼텍스 컵 간격이  $0.2\text{mm}\sim 0.65\text{mm}$ 에서 최적의 흡입 압력이 생성된다고 보고하였다.

Wu 등<sup>(6)</sup>은 다양한 난류 모델을 적용하여 실험과 비교하였고 그 중에 RNG  $k-\epsilon$  난류해석 모델이 실험과 가장 잘 일치함을 보고하였다.

Kim과 Sohn<sup>(7)</sup>은 RNG  $k-\epsilon$  난류를 사용한 3차원 유동 해석을 통해 유량변화에 따른 실험결과와 비교하여 계산의 정확도를 검증하였다.

본 연구에서는 물질에 특성에 의존하는 전자기 방법이 아닌 공기 역학적 방법을 이용하되 선회 속도를 이용하여 안정적으로 큰 부상력을 가질 수 있는 방법인 볼텍스 컵의 특성을 파악하고 볼텍스 컵의 길이 그리고 직경 조건에 따른 하부 생성 흡입 압력 생성의 최적 조건을 구하고자 한다.

## 2. 수치 해석

볼텍스 컵의 내부 유동은 3차원 정상(steady

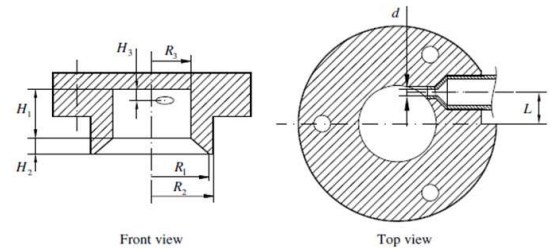


Fig. 1 Structure shape of vortex cup (ref. 3)

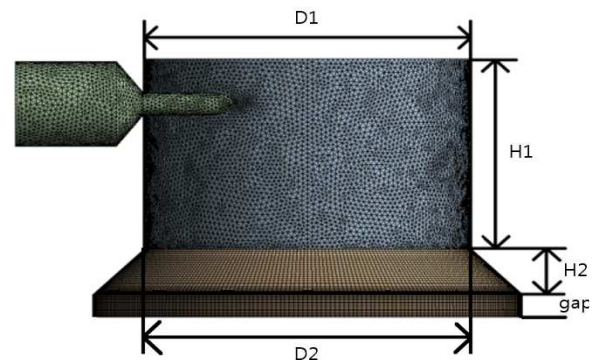


Fig. 2 Geometric and grid for standard vortex cup

state) 유동해석을 수행하였으며, 공기의 압축성 효과를 고려하기 위하여 에너지 방정식을 함께 해석하였다. 난류모델은 Wu 등<sup>(6)</sup>의 문헌을 참조하여 RNG  $k-\epsilon$  모델을 적용하였고 상용프로그램인 Fluent를 사용하였다. 사용한 지배방정식 등은 참고문헌<sup>(4)</sup>에 나와 있으며, 해석은 SIMPLE 알고리즘과 공간 차분에 2차 정확도의 upwind scheme을 적용하였다.

Fig. 2는 Ma 등<sup>(3)</sup>이 실험한 볼텍스 컵을 표준형상으로 한 볼텍스 컵의 형상 표면 격자를 보여주고 있으며, Fig. 3은 표준형상을 변경한 볼텍스 컵과 격자를 보여주고 있다. 볼텍스 컵의 형상은 상부의 입구 노즐과 실린더 형태의 몸체 그리고 하부 디퓨저로 출구가 있다. 볼텍스 컵과 바닥면 사이의 틈새 간격으로 공기가 빠져나간다. 볼텍스 컵의 격자구성은 입구가 있는 상부는 노즐 형상으로 인해 사면체의 형태로 구성하였고, 출구가 있는 하부는 육면체로 구성하였다. 사용한 격자수는 약 40만 개를 사용하였다.

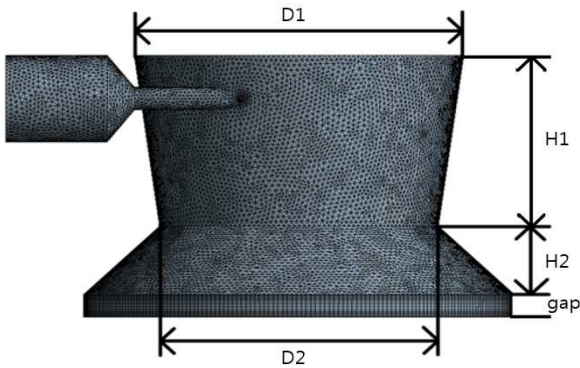
Fig. 2의 볼텍스 컵에 대해 본 연구에서는 H1의 길이를 7~10mm까지 7가지 다르게 변화하여 각각 해석하였으며, Fig. 2에 나타난 나머지 치수는 일정하게 두었다. Table 1에 실제 사용한 치수를 표시하고 있다.

**Table 1** Dimension of standard vortex cup

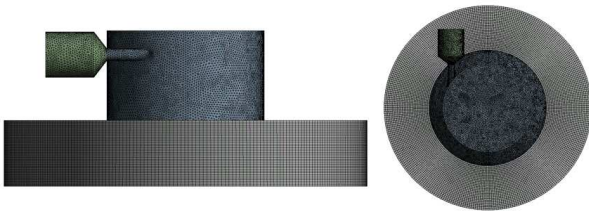
H1	H2	D1	D2	gap
7.0~10.0mm	2.0mm	13.0mm	13.0mm	1.0mm

**Table 2** Dimension of standard vortex cup

H1	H2	D1	D2	gap
8.5mm	2.0mm	13.0mm	11.0mm	1.0mm
7.5mm	3.0mm			
6.5mm	4.0mm			



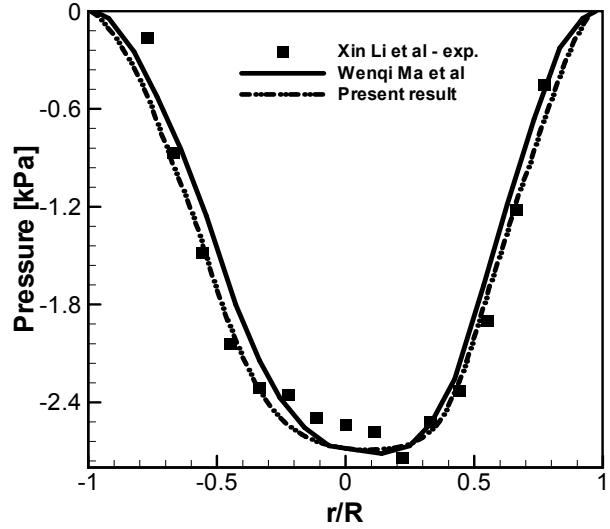
**Fig. 3** Grid of vortex cup with narrow throat  $D2 = 11$  mm



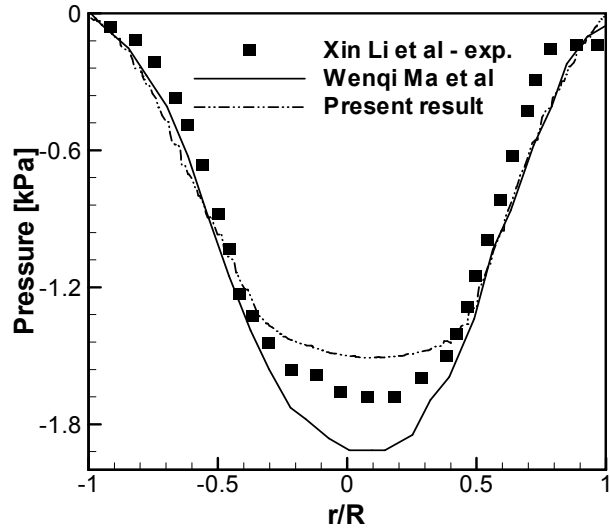
(a) Side view (b) Top view  
**Fig. 4** Grid system of vortex cup

Fig. 3은 선회 방향 속도로 인해 흡입 압력이 생성되는 볼텍스 컵의 특성을 고려하여 고안한 형태로  $D2$ 의 길이를 13mm에서 11mm로 변경하고 수직 위치  $H2$ 를 3가지로 바꾸어 해석한 형상 변화 모델이며, 치수는 Table 2에 나타내었다.

Ma 등<sup>(3)</sup>은 전산 유동 해석에 있어 출구 경계조건을 Fig. 2의 틈새에서 대기압 조건을 주었으나 본 해석에서는 출구 경계조건을 Fig. 4에서와 같이 대기 영역을 볼텍스 컵 바깥 영역으로 크게 주어 대기압 경계 조건을 주었다. 이는 틈새 출구에서 빠져나가는 공기의 속도가 크기 때문에 대기압조건을 주기에 무리가 있다고 판단하였기 때



(a) Gap = 0.45mm



(b) Gap = 1.0mm

**Fig. 5** Pressure distribution along center line for experiment and simulation results

문이며, 수치해석 결과 수렴성이 크게 향상되었다.

### 3. 해석 결과

해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 Table 1의 표준 형상 볼텍스 컵에 대해 실험과 기존의 해석 결과와 비교하였다.

Fig. 5는 유량  $2.14 \times 10^{-4} \text{kg/s}$ 에서 Xin Li<sup>(4)</sup> 등이 볼텍스 컵 아래 바닥 벽면에서 중심선을 따라  $R=10\text{mm}$ 까지 측정된 압력값과 Ma 등<sup>(3)</sup>의 해석 결과 및 본 해석 결과를 비교한 그래프이다. 틈새간격 0.45mm에서는 실험과의 최대 오차가 5.58%였으며, 틈새간격 1mm의 경우 최대오차가

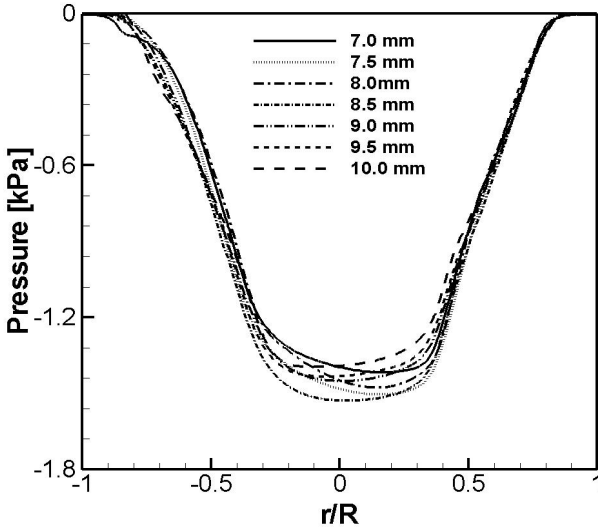


Fig. 6 Pressure distribution along center line for different H1 value

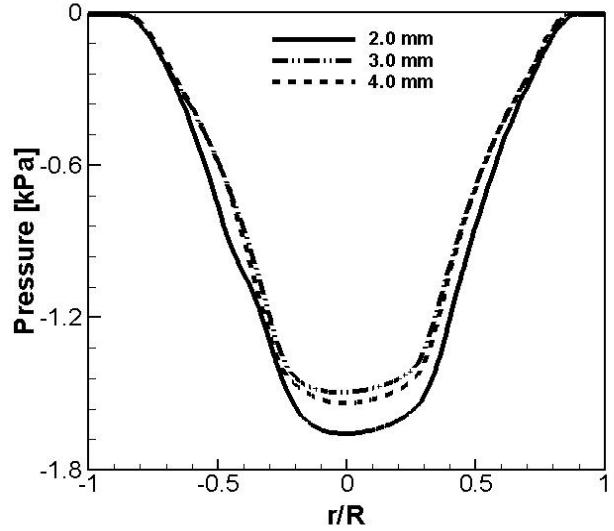


Fig. 8 Pressure distribution along center line for different H2 value

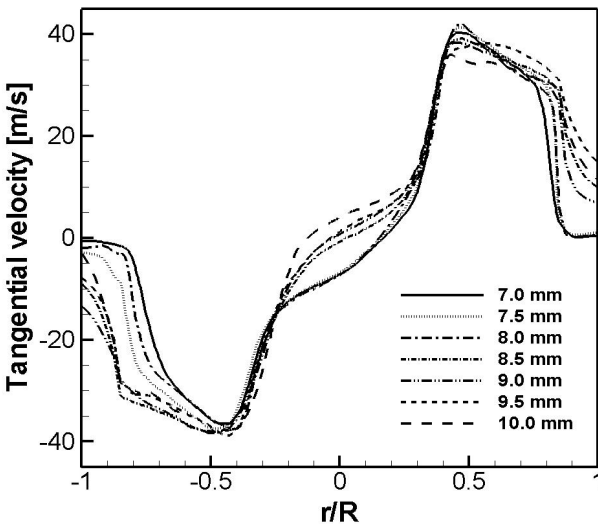


Fig. 7 Tangential velocity distribution along center line for different H1 value

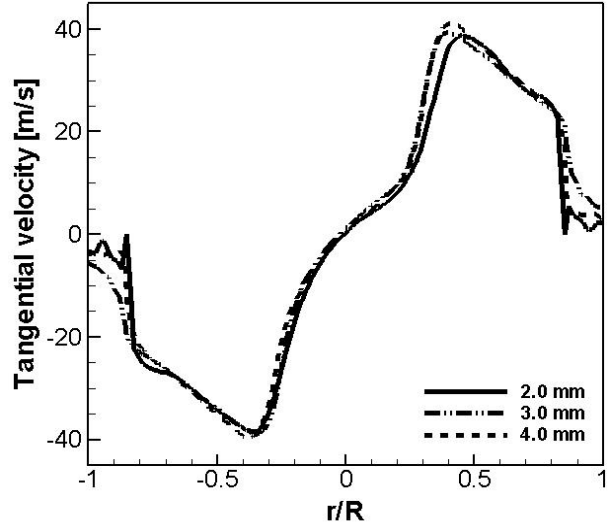


Fig. 9 Tangential velocity distribution along center line for different H2 value

4.85%로 실험값과 근사하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 볼텍스 컵의 길이 H1의 값을 8.5mm을 기준으로 7.0~10.0mm 까지 변경하여 계산한 정압 분포와 선회 속도 결과를 보여주고 있다.

최저 흡입 압력은 볼텍스 컵의 길이가 8.5mm인 경우로 계산되었고, 해석 대상인 볼텍스 컵 길이가 7.0mm로 짧은 경우와 너무 긴 경우인 10.0mm에서 오히려 흡입압력의 크기가 증가하지 못하였다. 이는 Fig. 7의 실선으로 표시된 7.0mm을 보면 볼텍스 컵의 길이가 작았기 때문에 공기 압력에너지가 충분히 선회운동에너지로 바뀌지 못하고 바로 틈새로 빠져나가기 때문으로 생각되며, 필요이상으로 볼텍스 컵 길이가 긴 10.0mm의

경우 마찰 손실 증가로 선회 속도의 감소로 인한 것으로 분석된다. 따라서 Fig. 2 형상조건에서는 볼텍스 컵 길이가 약 8.5mm 정도가 적당한 높이라고 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9의 그래프는 Fig. 3의 형상변화 모델의 해석 결과를 보여주고 있다. 볼텍스 컵의 총 높이는 10.5mm로 일정하게 두고 출구 가까이 볼텍스 컵의 직경 D2을 13mm에서 11.0mm로 감소시켰으며 노즐 목에 해당하는 D2의 위치, H2의 값을 2.0, 3.0 그리고 4.0mm에서 각각 해석하였다. 각각의 해석 결과는 볼텍스 컵의 길이 변화에 비해 흡입압력과 선회 속도의 차이가 두드러졌다.

Fig. 8은 볼텍스 컵의 노즐 목의 위치가 출구

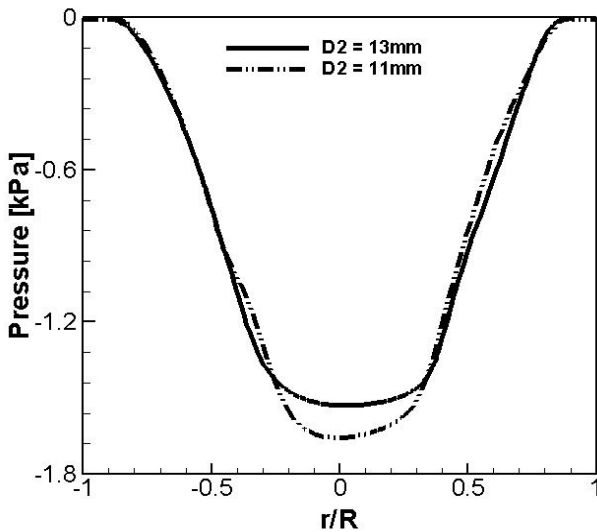


Fig. 10 Graph of pressure distribution with H1 = 8.5mm

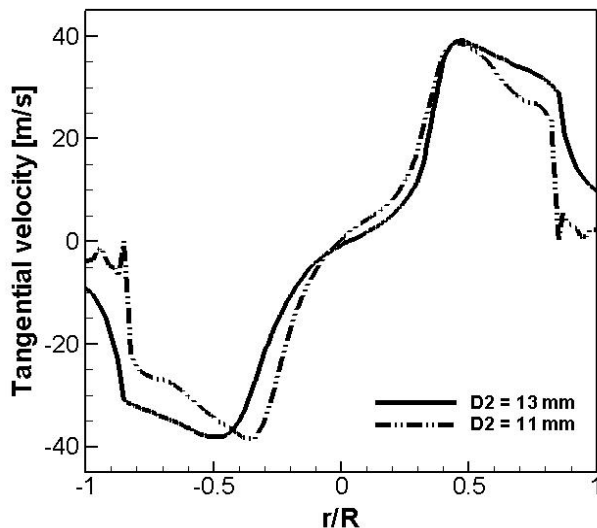


Fig. 11 Graph of tangential velocity with H1 = 8.5mm

쪽에 가장 가까운 경우인 H2가 2.0mm에서 볼텍스 컵 바닥 벽면의 압력이 가장 낮음을 보여주고 있으며, H2가 2.0mm가 아닌 경우는 흡입 압력생성이 충분치 못하고 오히려 Fig. 2의 형상 보다 못한 결과를 보여 주고 있다. 이는 Fig. 9에서 보여 주듯이 노즐 목의 위치가 출구 영역에서 너무 떨어져 있으면 확대관 형상의 길이 증가로 인해 선회 속도에 영향을 받는 것으로 판단된다.

볼텍스 컵의 형상변화에 대한 흡입 압력 증가 효과를 분석하기 위해 압력과 선회 속도의 결과를 Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10, Fig. 11에서 D2=13mm 표시한 결과는 Fig. 2와 같은 표준 볼텍스 컵 형상으로 H1의 길이가 8.5mm인 경

우의 결과이며, D2=11mm의 결과는 Fig. 3과 같이 노즐 형상으로 변경한 H2=2.0mm 경우의 해석 결과이다.

Fig. 10의 흡입압력을 비교하면 노즐 형상의 볼텍스 컵 계산 결과가 표준 형상에 비해 흡입압력의 절대값이 약 8.5% 증가하였다. 흡입 압력으로부터 면적분을 통해 계산된 흡입력은 약 1% 증가를 보였다.

Fig. 11은 노즐 형상의 볼텍스 컵과 단순 표준 형상의 볼텍스 컵의 선회 속도 변화를 보여 준다. 표준 형상의 볼텍스 컵에 비해 볼텍스 컵 목의 직경이 작은 형상변화 모델이 보다 출구 확대관의 형상으로 인해 좀 더 빠르게 선회 속도가 영으로 접근함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

볼텍스 컵의 높이와 반지름을 변경하여 최적의 흡입 압력 생성 조건의 형상을 찾기 위한 전산유동해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 3차원 유동해석 결과는 실험 결과와 약 5% 내에서 일치하였다.
- (2) 표준 형상의 볼텍스 컵에서 선회속도가 적절히 발달 할 수 있고 또 마찰 손실이 최소화 되는 적정 길이가 존재한다.
- (3) 볼텍스 컵의 형상을 노즐 형상으로 변경한 형상 변화 모델을 제안하였고 이 모델이 표준 형상 볼텍스 컵에 비해 더 큰 흡입압력을 생성할 수 있음을 확인하였고, 이는 볼텍스 컵 설계 때 고려해야할 중요 요소라 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013-0025260)

#### 참고문헌 (References)

- (1) Vandaele, V., Lambert, P. and Delchambre, A., 2005, "Non-contact Handling in Microassembly: Acoustical Levitation," *Precision Engineering*, Vol. 29, pp. 491~505.
- (2) Davis, S., Gray, J. O. and Caldwell, Darwin G., 2008, "An End Effector Based on the Bernoulli

- Principle for Handling Sliced Fruit and Vegetables," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, pp. 249~257.
- (3) Ma, W., Xu, L. and Yu, H., 2010, "Study in Flow Field Characteristics of Non-Contact Vortex Negative Pressure Carrier," *International Conference on Measuring Technology and Mechantronics Automation*, pp. 587~591.
- (4) Kim, J. H., 2013, "Computational Flow Analysis for the Optimization of the Vortex Cup," Master thesis, Kyungpook National Univ.
- (5) Li, X., Kawashima, K. and Kagawa, T., 2008, "Analysis of Vortex Levitation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 1448~1454.
- (6) Wu, Q., Ye, Q. and Meng, G. X., 2011, "Application and Comparison of Different Turbulence Models in the Three-Dimensional Numerical Simulation of Non-Contact Swirl Sucker," *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, Vol. 18, pp. 337~342.
- (7) Kim, J. H. and Sohn, C. H., 2012, "Analysis of Negative Pressure According to Flow Rate and Shape of Vortex Cup," *7<sup>th</sup> National Conference on Fluids Engineering*, pp. 92~93.