

수평 보텍스 링의 동적 특성에 대한 3차원 수치해석 및 실험

여창호[†] · 서용권^{*}

Three Dimensional CFD and Experiment Study on the Dynamic Characteristics of a Horizontal Vortex Ring

Chang Ho Yeo and Yong Kweon Suh

Abstract

In this paper, we report the numerical and experimental solutions of the dynamic characteristics of a vortex ring in a circular cylinder generated by impinging a fluid blob from a hole on the bottom wall of the cylinder. We managed to visualize successfully the flow pattern shown on the vertical and horizontal planes by using a specially designed optical apparatus. Results of three-dimensional computation for the flow are shown to be in a satisfactory agreement with the experimental ones. We also report the experimental results which show a breaking of the axi-symmetric pattern after the vortex touches the free surface.

Key Words : Vortex ring(보텍스 링), Free surface(자유표면), Circular cylinder(원통)

1. 서 론

회전유동에 대한 기초연구는 지구상의 해양유동, 기상 유동 등 지구의 회전이 중요한 인자로 작용하는 큰 스케일의 유체 유동해석에 매우 중요한 역할을 한다. 또한, 펌프, 터빈 등과 같은 회전 유체기계 내부의 유동해석 및 설계에도 매우 중요하게 사용된다.

회전유동은 회전의 효과가 충분히 큰 경우 회전축에 대한 직각 단면(일반적으로 수평 단면)에서의 유동이 축방향 위치와 거의 무관하게 일정하다는 Taylor-Proudman 이론이 성립하기 때문에 용기의 바닥 또는 자유표면에서의 Ekman 분출 모델만 잘 사용하면 2차원 해석으로서 실제 유동을 매우 잘 재생할 수 있다. 그리하여 최근

에는 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

이 같은 일련의 연구결과들을 보면 Verzicco 등⁽¹⁻³⁾은 회전의 영향으로 유동장에 관성진동이 발생함을 언급하였고, 원통 좌표계를 사용한 수치해석의 방법에 있어서 지배방정식에 생기는 특이성을 해결하고자 유한체적법(FVM)을 사용하고 엇갈림 격자계를 채용한다면 중심축에서의 특이성은 피할 수 있다고 보고하였다.

Suh & Yeo⁽⁴⁾는 배경회전이 없는 상태에서의 수평 보텍스 링의 거동에 대하여 2차원적으로 수치해석 하여 실험결과와 잘 일치함을 보였다.

본 연구는 회전유동에 대한 기초연구로서 회전하고 있는 액체 중에 바닥으로부터 수평 보텍스(vortex tube가 수평으로 놓여져 있다는 의미)를 회전축방향으로 쏘아 올렸을 때 그 보텍스의 거동을 3차원적으로 수치해석 한 결과를 제시하고자 하는 것이다. 이러한 기본연구는 Ekman 분출 모델의 개발에 중요한 밑거름이 될 것으로 보인다.

[†] 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과
E-mail : chy eo@donga.ac.kr

^{*} 회원, 동아대학교 기계공학부

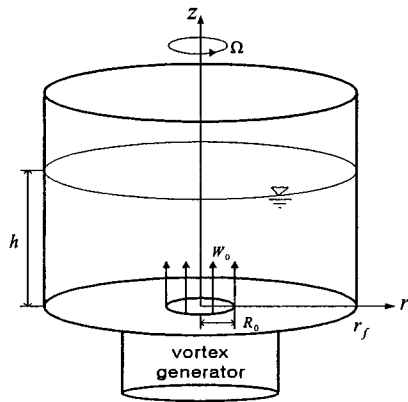


Fig. 1 Dimensionless coordinates and the vortex generator on the bottom wall.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 보텍스 링의 유동가시화를 위한 실험 장치이다. 주 실험장치는 직경 25cm의 원통 용기와 그것을 둘러싼 직사각형 용기, 그리고 이들 하부에 부착된 보텍스 생성장치(vortex generator)로 구성된다. 원통 형상의 보텍스 생성장치의 상부에는 가시화용 원통 용기가 바로 연결되어 있고 그 사이에는 직경 5cm의 구멍이 뚫려져 있어 노즐의 역할을 한다. 보텍스 생성장치에 유입되는 가시화용 유체는 형광염료와 물을 혼합한 것으로 보텍스 생성장치의 하부 구멍으로 유입된다. 유입된 제트가 직접 노즐을 통해 상부의 가시화용 용기에 분출되는 것을 막기 위해 보텍스 생성장치의 하부에는 간막이를 설치하였으며 가장자리에 8개의 구멍을 뚫어 형광액의 출입을 자유롭게 하였다. 가시화용 형광액은 내경 0.8cm의 비닐 튜브를 통해 별도의 상부수조로부터 자연낙하의 원리에 의해 공급되도록 하였다. 연결 튜브의 중간에 차폐용(on-off) 전자밸브를 설치하여 일정한 시간동안만 형광액이 공급되도록 하였다.

2.2 실험방법

본 실험은 상부수조에서 형광염료(Fluorescein)를 혼합하는 것으로부터 시작된다. 만들어진 형광액은 연결 튜브를 통해 보텍스 생성장치로 공급된다. 공급되는 형광액의 유량을 정하기 위해, 원하는 상부수조의 높이에서 별도의 실험을 수행

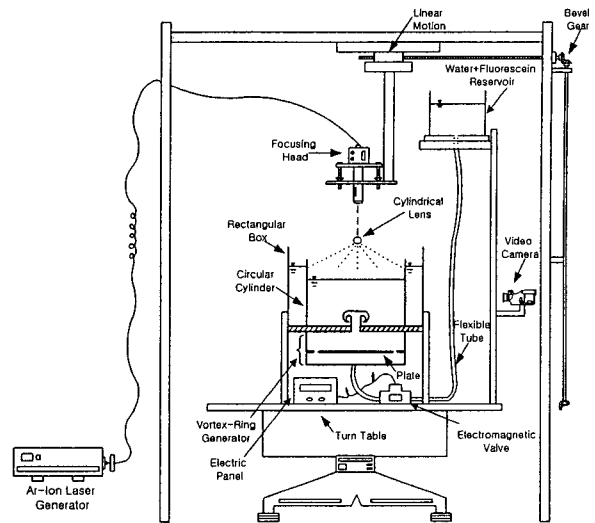


Fig. 2 Experimental apparatus for visualization of for vortex ring.

하여 수회에 걸쳐 유량을 측정하였으며, Moody 선도에 의한 관 마찰 계산을 통해 그 타당성을 확인하였다. 상부 수조의 높이 1m 정도에서는 개략적으로 3cm/s의 유속이 노즐로부터 만들어진다. 수위가 노즐 위치까지 도달하였을 때 밸브를 닫고 노즐의 상부를 얇고 무거운 원판으로 막은 상태에서 가시화용 원통에 물을 주입한다. 촬영시 굴절효과를 없애기 위해 사각형 용기에도 물을 채운다. 원통 용기에 물을 채운 후 1시간 이상 대기한다. 그리고 레이저 광은 미리 오랫동안 비추어 두면 부분적으로 레이저 광을 받은 물이 자연대류 현상을 일으켜 물의 온도를 상승시키기 때문에 촬영 직전에 비추도록 하였다. 시간이 지나면 노즐을 막은 원판을 조심스레 치우고 약 5분 정도 뒤에 레이저 광을 비춘다. 그리고 3초 동안 밸브를 열어 형광 액이 노즐을 통해 공급되도록 하고 보텍스 링의 거동을 녹화한다.

3. 수치해석과 실험결과 및 검토

보텍스 링의 3차원 수치해석을 위하여 상용 코드 CFX를 사용하였다. 입구와 출구에서의 경계 조건은 속도(normal speed)조건을 설정하였다. 격자망은 사면체 모양의 구조로 하여 약 76만개의 셀로 구성하였다. 그리고 보텍스 링이 만들어지는 노즐 부근과 상부표면에서는 해의 정확성을 위해서 좀 더 세밀하게 격자망을 구성하였다. 실험과 동일한 조건으로 수치해석 하였고 노즐의 직경과 노즐에서의 속도를 기준으로 한 레이놀즈

수는 750이며 수치해석과 실험 모두 배경회전이 없는 정지된 상태에 대한 결과들이다. 수치 계산에 대한 시간스텝은 0.005s부터 시작하여 서서히 증가시켜 최종적으로 0.2s로 하여 계산하였으며 24s까지 계산을 수행하였다.

Fig.3은 회전효과가 없는 상태에서의 $Re=750$, 수심 18cm, 노즐로부터의 분사시간(t_0)은 3s에 대한 실험결과로서 분사 후 보텍스의 말림 현상이 뚜렷이 포착되고 있으며 보텍스 링이 자유표면에 도달하고 나서부터는 두 개의 보텍스 링으로 분기되는 것을 볼 수가 있다. 이것은 자유표면에 전단응력이 강하게 작용하고 있음을 의미하며 자유표면에서의 전단응력을 자유표면의 특성(표면장력, 탄성 등)과 어떠한 형태로든지 연관지어야 함을 의미한다.

Fig.4는 실험과 동일한 조건에 대한 3차원 수치해석의 결과를 와도로 나타낸 것이다. 실험결과인 Fig.3과 비교하면 초기 보텍스 링의 말림현상이나 자유표면에서의 보텍스 링이 분기되는 현상 등 전반적으로 잘 일치하지만 보텍스가 자유표면에 닿는 시점은 수치해석 결과가 더 빠른 것으로 나타났다. 이는 실험에서의 노즐로부터의 제트 분출속도와 수치해석에서의 분출속도가 다른 것이 하나의 원인으로 작용한다고 판단된다.

Fig.5는 바닥으로부터 10cm 및 17.5cm 떨어진 수평단면 상에서 실험 시작 후 8초 및 24초 되는 시점에서 얻은 염료의 변형모양(좌측)과 등와도 모양(우측)을 그린 것이다. 등와도의 모양이 염료의 변형을 대변한다고 보면, 회전효과가 없는 상태에서 노즐에서 분사된 보텍스 링은 초기에는 거의 완전한 원형을 이루면서 올라오는 현상이 잘 재현되고 있음을 알 수 있다(Fig. 5a). 그러나 링이 자유표면에 닿고 옆으로 퍼질 때는 수치해석 결과가 실험 결과에서 관측되는 불안정

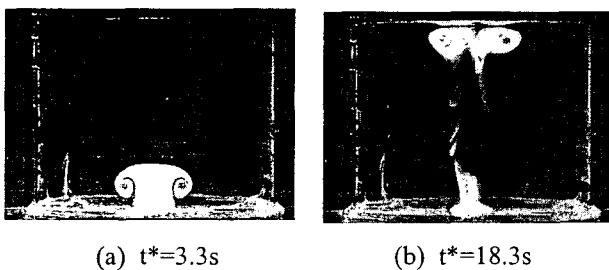


Fig. 3 Flow-visualization result for the dynamics of a vortex ring at $Re=750$, $\epsilon=\infty$, $H=18$ and $t_0=3s$ (vertical plane).

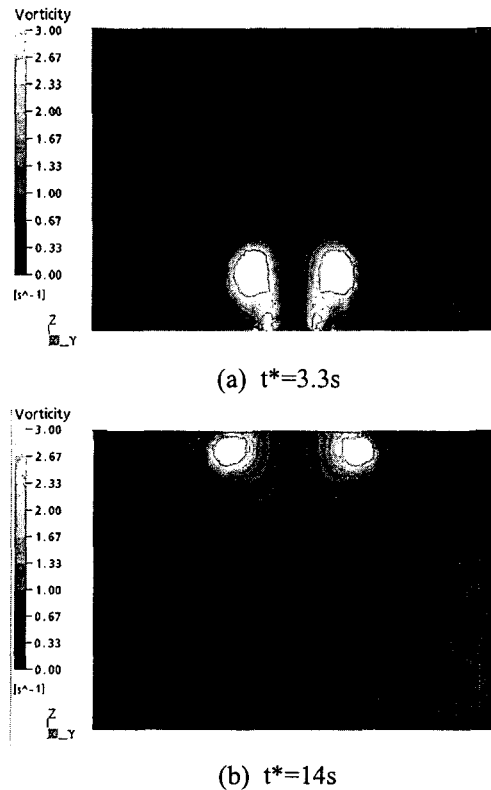


Fig. 4 Vorticity contours at two instants of time obtained from the numerical solutions at $Re=750$, $\epsilon=\infty$, $H=18cm$ and $t_0^*=3s$.

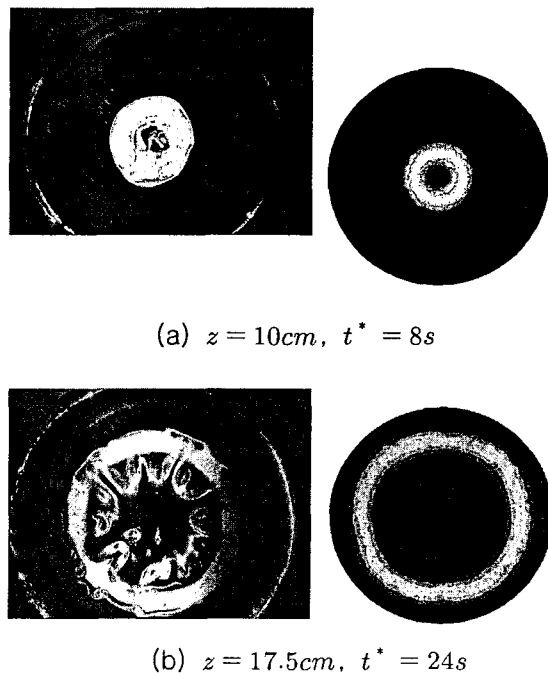
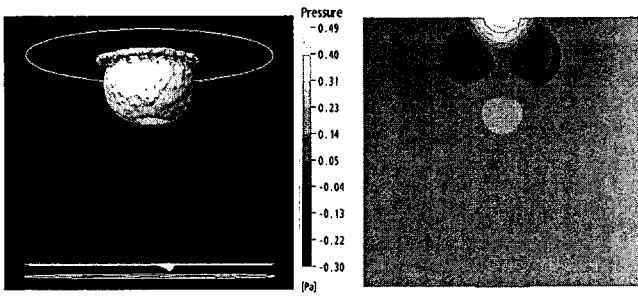


Fig. 5 Flow-visualization (left) and numerical solution (right; vorticity contour) at the horizontal planes.



(a) Equi-vorticity surface (b) pressure contour

Fig. 6 Numerical results of equi-vorticity surface of the vorticity 0.5 and the pressure contour at the vertical plane at $t^* = 11.5s$.

성을 올바르게 예측하지 못함을 알 수 있다(Fig. 5b).

Fig. 6은 $t^* = 11.5s$ 되는 시점에서 얻은 수치해석 결과로서 등와도 면과 압력 분포를 나타내고 있다. 이 시점은 보텍스 링이 수면에 막 닿기 시작하는 시점이다. 와도는 표면에서 얇은 층을 이루면서 급격히 퍼져나가고 보텍스 링의 내부는 저압으로 링이 닿는 표면은 고압으로 형성되고 있다.

4. 결론

- (1) 수치해석 결과는 초기 보텍스 링의 말림 현상을 잘 보여주고 있다.
- (2) 수평단면에서 관찰된 보텍스 링은 초기에는 거의 원형이나 자유표면에 닿고 나서는 실험에서는 불안정성이 관찰되었고 수치해석에서는 여전히 원형을 유지하여 차이를 보였다.

(3) 회전효과가 없는 상태에서 레이놀즈 수 750에 대한 수직, 수평 단면에 대한 가시화 실험을 성공적으로 수행하였으며, 본 연구를 통해 개발된 레이저 광 조명 시스템은 추후 유효하게 사용될 전망이다.

후 기

이 논문은 2002-3년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-041-D00080)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Verzicco. R., Olandi. P., Eisenga. A. H. M., Van Heijst. G. J. F. and Carnevale. G. F., 1996, "Dynamics of a Vortex Ring in a Rotating Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 364, pp. 215~239.
- (2) Verzicco. R., Eisenga. A. H. M., and Van Heijst. G. J. F., 1998, "Dynamics of a Vortex Ring Moving Perpendicular to the Axis of a Rotating Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 354, pp. 69~100.
- (3) Verzicco. R. and Olandi. P., 1996, "A Finite-Difference Scheme for Three-Dimensional Incompressible Flows in Cylindrical Coordinates," *J. Comput. Phys.*, Vol. 123, pp. 402~414.
- (4) Suh. Y. K. & Yeo. C. H., 2004, "Movement of a Horizontal Vortex Ring a Circular Cylinder", *KSME(B)*, Vol. 28, No. 6, pp. 652~658.