

< 논문 >

배경회전 하의 수평 보텍스의 거동

서 용 권[†] · 여 창 호^{*}

(2005년 3월 10일 접수, 2005년 9월 14일 심사완료)

Motion of a Horizontal Vortex Under a Background Rotation

Yong Kweon Suh and Chang-Ho Yeo

Key Words : Vortex Ring(보텍스 링), Background Rotation(배경회전), Numerical Simulation(수치모사), Inertial Oscillation(관성진동), Axi-Symmetric Flow(축대칭유동)

Abstract

In this paper we present the numerical results of the behavior of the horizontal vortex generated by ejecting a liquid vertically upward from an orifice into the bulk fluid above the orifice. The numerical calculation has been performed for the axi-symmetric Navier-Stokes equation. A simple flow-visualization experiment was also conducted to qualitatively verify the numerical solutions. Three cases of the flow configurations studied in this paper are; firstly, the vortex was generated without any background rotation, secondly, the vortex was made under a full background rotation, and thirdly, the vortex was made during the spin-up process such that only the region adjacent to the side wall was set into motion viewed in the inertial frame of reference. It was shown that the swirl flow at the inlet boundary affects considerably the formation and development of the vortex for the second case. In the third case, it was remarkable to see that the vortex cannot penetrate into the region near to the side wall of the tank, because of the strong swirl flow and corresponding high pressure gradient in the region.

1. 서 론

보텍스(vortex)는 일반적으로 회전하는 유체의 움직임을 일컫는다. 다르게 표현하자면, 보텍스는 보텍스 필라멘트(vortex filament)라는 와도의 줄기가 모여서 형성되는 보텍스 튜브를 지칭하며, 축대칭 유동의 경우에는 링 모양을 이루기 때문에 보텍스 링(vortex ring)이라 부른다. 우리는 일상생활에서 흔히 담배연기로 만들어진 보텍스 링(즉, smoke ring)을 자주 보게 된다. 만약 링에 작용하는 외력이 없고 다른 장애물도 없다면 보텍스 링은 자체의 상호작용에 의해 병진운동을 하며 발전한다.

이같은 보텍스 링은 다양한 응용분야를 내포하

고 있다. 난류분야에서는 보텍스의 불안정성, 신장(stretching), 와류합침(vortex merging) 및 와류 분리(vortex splitting) 등의 개념으로 난류의 복잡성을 이해하려는 경향이 많은데, 이 때 보텍스 링은 가장 단순한 구조이면서도 이들 특성이 모두 나타나는 유동모델이기 때문에 많은 난류 연구자들이 즐겨 다루어 왔다. 실제로 보텍스 링 혹은 그에 근접한 형태는 자연현상과 공학에서 많이 접할 수 있다. 해저바닥이나 맨틀 내부에서 지역별 밀도 차에 따른 부력이 플룸(plume)을 만들고 이것이 보텍스 링으로 발전하는 경우가 많다.⁽¹⁻⁴⁾ 화산이나 핵 폭발시 거대한 버섯구름의 모양은 바로 보텍스 링에 해당하며, 해저 동물 중에는 보텍스 링으로부터 추진력을 얻는 동물도 있다. 또한 심장의 좌심실에서 혈액을 내보낼 때도 이러한 링 모양의 보텍스가 나타나고 있다. 보텍스 링의 존재 및 그 변형으로 인해 소음이 발생하는 것으로 알려져 있으며 소음과 보텍스 링의 불안정성과의 관

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학부
E-mail : yksuh@dau.ac.kr
TEL : (051)200-7648 FAX : (051)200-7656
^{*} 동아대학교 대학원 기계공학과

계를 규명하려는 노력이 이어지고 있다.⁽⁵⁾ 최근에는 보텍스 링의 원리를 이용한 믹서기가 등장하기도 하였다. 1990년대 초까지의 보텍스 링의 연구 성과에 대해서는 Shariff & Leonard⁽⁶⁾가 자세히 분석한 바 있다. 보텍스 링에 관한 현재까지의 연구 논문을 분석해 보면, 단일 보텍스 링 자체의 형성 과정과 형성 후의 발전 혹은 불안정성에 주로 많은 관심을 두고 있음을 이해할 수 있다.⁽⁷⁻¹⁵⁾ 그리고, 두 보텍스 링의 충돌,⁽¹⁶⁾ 평판^(17,18) 및 볼록 면⁽¹⁹⁾에 부딪힌 링의 거동에 대해서도 관심을 보이고 있다.

한편, 회전유동은 터보유체기계 내 유동, 기상 및 해양유동, 맨틀 유동 등에서 나타나는 특징적 유동으로서 좌표계 자체가 회전하면서 인위적인 각종 힘들(원심력, 코리올리스 힘 등)이 방정식에 추가되는 경우를 의미한다: 그러나 때로는 정지 좌표계에서도 대부분의 유체가 스윙을 동반하는 경우에도 스윙과 같이 회전하는 좌표계로 보면 회전유동의 범주에 포함시킬 수 있다. 회전유동에 관한 가장 기본적이면서도 중요한 이론은 Taylor-Proudman 이론으로서 회전축에 수직인 단면(앞으로는 '수평' 단면이라 부르기로 함) 상에서의 유동 모양은 회전축 방향(앞으로는 '수직' 방향이라 부름)의 위치와 무관하게 일정하다는 이론이다.⁽²⁰⁾ 그리고 수직 방향의 운동은 억제되고 유체입자는 수평단면 상에서만 이동하려는 경향이 강하다. 이러한 의미에서 수평 보텍스 링(와도의 방향이 수평 방향인 보텍스 링)이 회전의 영향을 받았을 때 그 후의 발전과정이 어떠한지에 대한 의문이 자연스럽게 발생한다.

이에 따라, Eisenga 등⁽²¹⁾은 강제회전하는 유체 중에 수평으로 제트를 쏘았을 때 발생하는 보텍스 링의 거동에 관해 실험적 및 수치해석적 연구를 수행하였다. 결과, 링 주위의 유체는 코리올리스 힘의 영향으로 상당히 큰 변화를 일으키는 것으로 밝혀졌다. Verzicco 등⁽²²⁾은 강제회전하는 유체 중에 수직으로 쏘아 보텍스 링을 만들었을 때의 경우에 대해 역시 실험과 수치해석에 의해 연구를 수행한 바 있다. 배경회전이 있는 경우에는 보텍스의 거동이 매우 복잡하였으며 링의 병진 운동도 상당히 억제되는 것으로 관찰되었다. 그러나 위 연구들은 아직 회전효과에 관한 초기 연구에 지나지 않으며, 배경회전이 링의 거동에 미치는 여러 가지 영향에 대한 연구는 여전히 미개척 분야로 남아 있다.

본 연구는 수평 보텍스 링의 거동이 배경회전의 영향 하에서 어떻게 발전하는지에 대한 의문에서 출발하였다. 본 연구에서 연구대상으로 삼은 유동 모델은 앞의 Verzicco 등⁽²²⁾의 연구와 유사하다. 그

러나, 그들의 연구에서는 보텍스 형성의 과정에서 나타나는 입구 경계조건의 영향에 대해서는 전혀 고려하지 않았으나 본 연구에서는 이의 효과를 고려하였으며 또한 그들의 연구에서는 링이 상부의 자유표면에 충돌하기 전까지만을 대상으로 하였으나 본 연구에서는 충돌 후까지의 거동에 대해서도 다루었다. 추가로 본 연구는 스펀업 과정에서 제트를 분출시켰을 경우에 대해서도 살펴보았으며 그 결과는 매우 흥미로웠다.

유동의 해는 지배방정식인 축대칭 2차원 Navier-Stokes 방정식을 수치해석적으로 구하였으며, 원주방향의 불안정성에 대한 확인을 위하여 3차원 수치해석도 병행하였다. 그리고 유동가시화 실험을 수행하여 수치해석 결과의 타당성을 정성적으로 확인하였다.

2. 수치해석

보텍스 링은 동점성계수 ν , 밀도 ρ 의 유체가 높이 H 만큼 담긴 원통용기(앞으로는 '상부 원통'이라 칭함: Fig. 1 참조) 내에 용기 바닥의 중심에 위치한 반경 R_0 의 오리피스를 통해 그 하부의 용기(앞으로는 '중상부 원통'이라 칭함)로부터 같은 유체를 쏘아 올리는 방법으로 생성시켰다. 원통을 포함한 모든 장치는 각속도 Ω 로 회전한다. 오리피스로부터 분출되는 수직방향의 평균 유속을 \bar{W} 라 할 때, 길이는 R_0 로, 유속은 \bar{W} 로, 시간은 R_0/\bar{W} 로, 압력은 $\rho\bar{W}R_0\Omega$ 로 무차원화 시키면 회전좌표계에서의 3차원 지배방정식은 다음과 같이 된다.

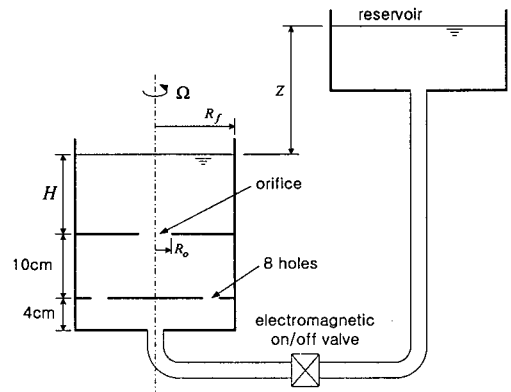


Fig. 1 Schematic of the flow model for both the numerical simulation and flow-visualization experiment

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u} \tag{2}$$

여기서, $\nabla = (\partial/\partial r + 1/r, \partial/\partial \theta, \partial/\partial z)$ 는 3 차원 구배 (gradient) 연산자, t 는 시간, r, θ, z 는 각각 반경 방향, 원주방향 그리고 축방향 좌표(좌표의 원점은 오리피스의 중심에 있음), $\mathbf{u} = (u, v, w)$ 는 유속 벡터, 그리고 p 는 압력이다. 운동량 방정식 (2)의 비선형 항은 코리올리스 힘 $(-2v/\varepsilon, 2u/\varepsilon, 0)$ 을 포함하고 있다. 무차원 파라미터 Re 와 ε 은 각각 레이놀즈 수와 로스비(Rossby number)로서 아래와 같다.

$$\text{Re} = \frac{\bar{W} R_0}{\nu}, \quad \varepsilon = \frac{\bar{W}}{R_0 \Omega}$$

또다른 파라미터는 원통용기의 무차원 반경 $r_f (= R_f / R_0)$, 원통 용기 내 무차원 수심 $h (= H / R_0)$ 이다.

상부 원통, 중앙부 원통 및 그 아래의 하부 원통(Fig. 1에서 깊이 4cm의 원통)은 물론, 염료-물 혼합액을 주입하는 수조와 유입관 등 모든 시스템은 실험이 시작될 때 (1) 정지해 있던가, (2) 정지 상태에서부터 회전을 시작하여 짧은 시간만에 각 속도 Ω 에 도달하는 스핀업 과정에 있던가, (3) 충분히 오랜 시간동안 각 속도 Ω 의 강제회전 상태에 있게 된다. 오리피스로부터 제트는 $t_s \leq t \leq t_f$ 의 기간동안만 분출된다. 여기서 t_s 는 제트분출 시작 시간이고, t_f 는 제트분출 종료시간이다.

경계조건으로서, 측면 벽과 하부의 오리피스를 제외한 고체 경계면에서는 비침투 점착조건을 적용하였다.

유입부인 오리피스에서의 경계조건으로서는 처음에 주어진 시간동안 즉 $t_s \leq t \leq t_f$ 에서 균일한 수직방향 속도 w 에 0의 반경방향 속도를 부여하는 방법으로 경계조건을 설정하였으나, 수치해석 결과는 특히 배경회전이 있는 조건에서 실험결과와 상당히 다르게 얻어졌다. 그 이유는 당연히 중앙부 원통에서의 유동마찰과 유체관성에 있다. 즉 유체마찰로 인해 수직방향 속도는 공간적으로 불균일할 것이며, 유체관성으로 인해 반경방향 속도는 음의 값을 보일 것으로 쉽게 예측된다. 따라서, 상부 원통에 대한 본 계산이 전에 중앙부 원통에 대한 축대칭 유동해석을 수행하여 그 결과로부터 오리피스에서의 경계조건을 설정하는 방법을 사용

하였다. 단, 중앙부 원통에 대한 수치해석에서는 원통의 상부에 있는 오리피스에 수직방향으로 오리피스와 동일한 직경에 길이 10cm인 출구관이 연결되어 있는 것으로 가정하고 그 출구에서는 $t_s \leq t \leq t_f$ 의 시간동안 아래와 같이 공간적으로 균일한 수직방향 속도를 적용하였다.

$$w = 1 - \exp(-t) \text{ for } t_s \leq t \leq t_f$$

우변의 시간 함수는 Fig. 1에서 전자밸브가 부착된 유입관 내부의 혼합액의 관성과 유동마찰의 효과로 인해 전자밸브를 작동시킨 뒤부터 유속이 점차 증가하는 시간변화를 나타내는 것으로서, 원판 내 축대칭 유동에 대한 이론해석과 실험결과로부터 도출된 반실형식이다. 한편, 오리피스에서 혼합액이 분출되지 않는 시점에서는 오리피스에서 미끄럼 조건 즉

$$\partial u / \partial z = \partial v / \partial z = 0$$

을 적용하였다.

상부의 자유표면에서는, 하부 오리피스를 통해 유입된 유량만큼 수심이 증가하는 것으로 하였고 이에 따라 이동 격자계가 사용되었다. 그리고 상부 표면에서 반경방향 속도성분은 점착조건으로 하였으며 비교를 위해 미끄럼 조건도 적용하였다. 그리고, 자유표면에서 원주방향의 표면전단응력은 충분히 작다고 가정하여 원주방향 속도성분은 미끄럼 조건으로 설정하였다. 상부의 자유표면에서 반경방향 속도성분을 점착조건으로 설정하는 이유는 자유표면이 미지의 이물질의 막으로 얇게 도포된 것으로 가정할 수 있기 때문이다(실제, 자유표면의 모든 지점에서 미끄럼 조건을 적용할 수 있을 만큼 청정하게 유지하는 것이 매우 어렵다. 그리고, 부분적으로 오염된 경우에는 지역에 따라서 경계조건을 달리 적용해야 할 것이나 부분적인 오염의 정도를 측정하거나 분석하는 일은 그리 쉽지가 않다).

초기조건으로서 스핀업의 경우를 제외하고는 모두 0의 속도장이 설정된다. 스핀업의 경우에는 $\mathbf{u} = \mathbf{w} = 0$ 과 $\mathbf{v} = \mathbf{r}$ 이 설정된다. 초기시점 $t = 0$ 은 정지상태의 경우와 강제회전의 경우에는 제트가 분출되기 시작하는 시점이며, 스핀업의 경우에는 시스템이 회전하기 시작하는 시점이다. 즉 앞의 두 가지 경우는 $t_s = 0$ 이며, 스핀업의 경우는 $t_s > 0$ 이다.

수치해석을 위한 격자계는 균일 격자계를 적용하였으며 수직방향 격자선들은 고정되어 있으나 수평방향 격자선들은 $t_s \leq t \leq t_f$ 의 기간동안 자유

표면의 이동에 따라 시간과 더불어 상승한다. 자유표면은 거의 수평을 유지하므로 수평 격자선들의 방향은 변하지 않는 것으로 가정하였다. 공간 미분은 유한체적법에 의한 중심차분의 방법으로, 시간 미분은 fractional-step 방법으로 차분화하였다. 그리고 압력 방정식의 해법으로는 D-ILU의 전처리에 의한 ICCG(Incomplete Cholsky Conjugate Gradient)법을 사용하였다.⁽²³⁾

3. 가시화 실험

유동가시화 실험을 위한 장치와 실험 방법에 대해서는 저자들의 선행연구 논문⁽²⁴⁾에서 제시한 바 있다. 간단히 실험장치와 실험방법에 대해 설명하면 다음과 같다. 앞에서 제시한 Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 가시화 실험은 반경 R_f (12.5cm)의 상부 원통용기 내부에 대해 실시한다. 용기의 바닥에는 반경 R_o (2.5cm)의 오리피스와 있고, 그 아랫 쪽은 윗 쪽 용기와 같은 반경에 깊이 10cm의 중앙부 원통용기가 부착되어 있으며 바닥의 가장자리에는 8개의 작은 구멍이 뚫려져 있다. 가장 아랫 쪽에는 깊이 4cm의 하부 원통이 부착되어 있고 하부 원통 바닥의 중심에는 한 개의 유입구가 설치되어 있다. 수평 보텍스 링을 만들기 위한 물은 오른 쪽 위에 위치한 원통용기(reservoir)로부터 자연낙차의 원리에 의해 공급된다. 이 용기 내에는 물과 염료의 혼합액이 저장되어 있으며 호스를 통해 좌측의 가시화 장치에 연결되어 있다. 호스의 중간에 설치한 전자 밸브를 열면 낙차에 의해 혼합액은 좌측의 가시화 용기에 공급된다. 전자밸브는 정해진 일정한 시간동안만 혼합액이 좌측의 용기에 공급되도록 한다. 중앙부 용기의 바닥에 있는 8개 구멍의 목적은 전자 밸브가 갑자기 개방될 때 밸브 전방에 작은 공기방울이 형성되어 이것이 직접 오리피스를 통해 윗 쪽 주 탱크로 들어가는 것을 방지하기 위해서이다.

회전이 없는 상태에서는 간단히 전체 시스템을 고정시킨 상태에서 전자밸브를 개방하고 그 후 전개되는 보텍스의 거동을 비디오 카메라에 담은 뒤 분석하는 방법으로 실시된다. 두 번째 경우로서 스핀업 과정의 링 거동에 대한 가시화실험에서는 먼저 시스템을 회전시킨 뒤 정해진 시간(수초 혹은 수십초) 뒤에 혼합액을 분사하여 촬영을 한다. 세 번째 경우로서 강제회전의 경우에는 전체 시스템을 충분히 오랫동안 회전시켜 내부의 유체를 강제회전상태로 만든 뒤 전자밸브를 열어 보텍스를 형성시키고 가시화를 시작한다.

실험이 시작되기 전에 가장 중요한 확인사항은

상부 원통에 담긴 물과 링의 가시화를 위한 혼합액의 온도가 같도록 하는 일이다. 불과 1, 2도의 차이에서도 자연대류에 의한 영향으로 실험결과와는 상당히 달라지는 것으로 관찰되었으며, 따라서 실험 전에 항상 같은 온도가 유지되었는지를 확인하고 실험을 수행하였다.

4. 수치해석/실험 결과 및 검토

4.1 자유표면 경계조건의 영향-정지상태의 결과
먼저 정지 상태에서 수행한 수치해석의 결과를 제시한다. 수치해석의 타당성 확보를 위한 실험결과와의 비교를 위해서는 자유표면은 물론 오리피스에서의 올바른 경계조건의 설정이 무엇보다 중요하다. 공기와 접한 물의 자유표면은 흔히 무응력 조건으로 설정한다. 그러나 이 조건은 앞에서도 언급한 바와 같이 물의 표면이 상당히 청정한 상태를 유지할 때만 타당하며 실제의 경우로서 표면이 오염된 경우에는 오히려 점착 조건으로 하는 것이 더 좋은 결과를 줄 수 있다.

Fig. 2는 자유표면에서 반경방향 속도성분은 점착조건으로 하고 원주방향 성분은 무응력 조건으로 하여 수치해석한 결과로서 오리피스로부터 유입된 유체덩치가 시간과 더불어 변형해 가는 모습을 나타내고 있다. 단, 본 논문에서 제시한 모든 수치해석 결과는 실험장치에 맞추어 $r_f=5$ 의 조건에서 구한 것이다. 그리고 시간 스텝은 다음과 같이 $\Delta t=0.02$ 로 하였다.

이 결과를 보면, 보텍스가 상부 표면에 충돌하기 전까지는 전형적인 링의 병진운동과 더불어 링의 모양이 거의 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 링이 표면에 닿고부터는 링과 반대되는 부호의 와도를 가진 2차 링이 형성된다(Fig. 2의 $t=8$ 의 상황). 2차 링의 형성으로 인해 1차 링의 병진운동은 잠시 멈추고 대신에 말림현상이 나타난다. 2차 링의 와도가 1차 링의 와도보다 낮기 때문에 1차 링은 2차 링을 축방향으로 이동시킨다($t=10$). 2차 링이 상부 자유표면 가까이 접근하면 이미지 보텍스(image vortex)의 영향으로 2차 링은 중심축 쪽으로 이동하고, 1차 링은 반대 방향인 바깥 쪽으로 나아간다. 오리피스로부터 유체는 계속 공급되기 때문에 1차 링은 공급된 와도에 힘입어 제 3차 링을 만들고 앞과 유사한 작용을 하면서 3차 링을 중심축 쪽으로 이송시킨다($t=14$). 2차와 3차 링은 축에 가까운 영역에서 머물면서 상호 작용으로 인한 말림 현상을 보여주며, 1차 링은 다시 외벽의 구석에서 4차 링을 만들려고 하고 있다($t=20$). 최종적으로 1차 링은 측면 벽의 구석에서 머무는 형상을 보인다.

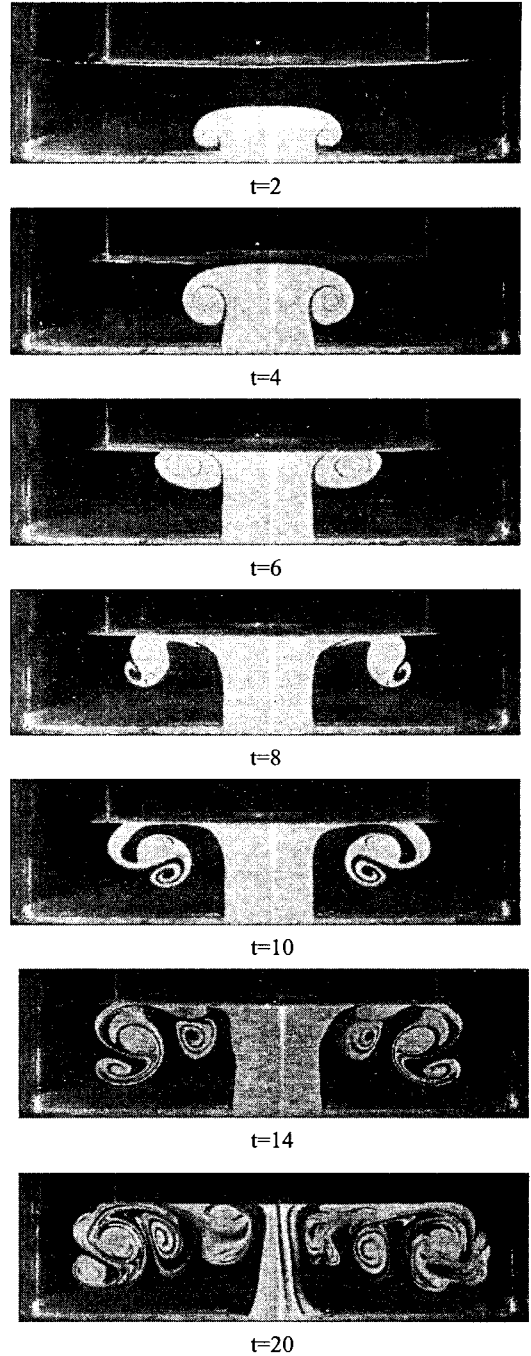
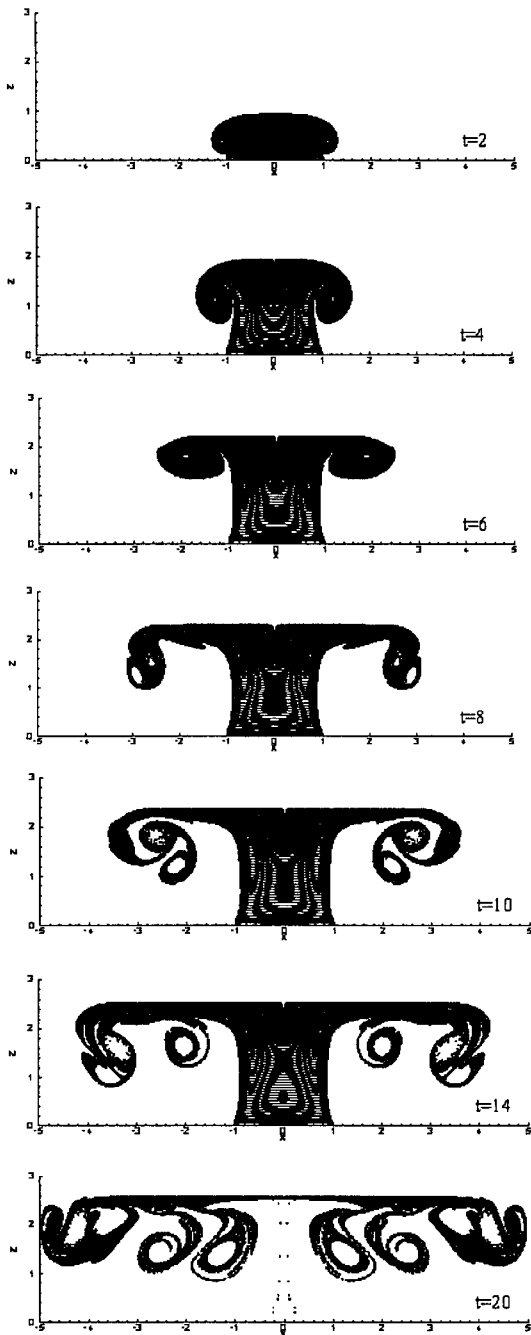


Fig. 2 Numerical result at various times for the stagnant case with $Re = 594$, $\varepsilon = \infty$, $h = 2$, $t_s = 0$, $t_f = 15$, $I \times J = 121 \times 61$

Fig. 3 Result of the flow visualization with the same parameter set as Fig. 2

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 수행한 가시화 실험의 결과이다. Fig. 2에서 제시한 것과 거의 같은 보텍스 거동을 보이고 있으며, 이로부터 수

치해석의 제반 과정이 타당함을 알 수 있다. 단, $t = 20$ 과 그 이후에서 나타나는 약간의 비대칭 형상은 실험장치의 정밀도 문제 혹은 실험 과정에서 발생하는 초기 교란의 영향으로 파악된다.

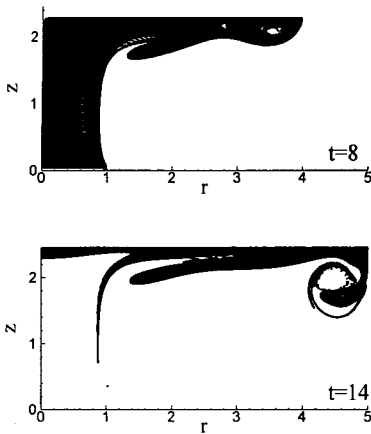


Fig. 4 Numerical result with the same parameter set as in Fig. 2 but with a free-slip condition for the radial velocity component at the free surface

Fig. 4는 앞과 같은 조건에서 자유표면에서의 반경방향 성분을 무응력 조건으로 하여 설정한 결과로서 표면이 매우 청정한 상태를 유지하는 경우에 대한 것이라 생각할 수 있다. 그러나 이 결과는 실제 실험결과(Fig. 3)와 비교하면 $t=8$ 이후에서 상당히 다르다는 것을 알 수 있다($t=6$ 까지는 앞과 유사함). 1차 링은 자유표면에서 2차 링을 만들지 못하고 단순히 병진운동만을 하며 궁극적으로 측벽 구석에서 머물게 된다. 이로부터 실제 실험과 잘 맞는 결과를 도출하기 위해서는 자유표면에서 점착 조건을 적용해야 함을 알 수 있다. 또한 이는 자유표면이 눈으로 확인되지 않는 이물질로 완전히 도포된다고 생각하는 것이 타당함을 입증하는 셈이다.

4.2 스핀업 과정에서의 보텍스 거동

원통 용기가 정지상태에서부터 회전을 시작하면, 초기에는 대부분의 유체가 역시 정지 상태에 있고 측벽 벽 근처에 인접한 유체만이 회전의 영향을 받고 회전을 시작한다(관성좌표계에서 관찰). 시간이 경과하면 이렇게 회전하는 영역과 회전하지 않는 중심부의 나머지 영역 사이의 경계가 중심 축 쪽으로 이동하면서 회전영역이 점차 넓어진다. 이와 같은 스핀업 과정에서 하부 오리피스로부터 제트를 분출시키면 중심부의 코어 영역은 거의 정지 상태에 있으므로 앞의 4.1에서 제시한 것과 거의 동일한 유동양상을 얻을 것이라 추측할 수 있다. 그러나 링이 자유표면을 따라 측벽 벽 쪽으로 이동하여 갈 때 정지영역과 회전영역 사이의 경계면을 만나면 어떠한 거동을 보일지는 쉽게 예측할 수가 없다. 본 연구에서는 이에 대한 수치해석과 실험을 수행하였으며 그 결과를 제시하고자 한다.

Fig. 5는 앞에서와 같은 조건에서 로스비 수를

$\varepsilon=1.7$ 로 하여 스핀업 시킨 뒤 $t=80$ 부터 $t=95$ 까지의 기간동안 제트를 분출시킨 경우의 보텍스 거동을 보여주고 있다. 그림에서 제시한 시간 값은 $t-t_0$ 에 해당한다. 이 결과와 정지상태의 결과인 Fig. 2를 비교하면, $t=10$ 까지는 두 결과가 거의 동일하며 $t=12$ 이후부터 달라지기 시작한다. 그리고 정지상태에서는 1차 링이 측면 벽의 모서리까지 진출하였으나(Fig. 2에서 $t=20$ 의 상황) 스핀업의 경우에는 $r_f=3.5$ 정도까지만 진출하고 더 이상 진출하지 못하는 흥미있는 결과를 확인할 수 있다. 이는 관성좌표계에서 보았을 때 측면 벽 근처의 회전영역에서는 유체의 회전으로 원심력이 존재하고 이로 인해 양의 압력 구배가 형성($\partial p/\partial r > 0$)되는 반면, 나머지 영역에서는 압력구배가 거의 0이 되기 때문이라 생각된다. 비유적으로 설명하자면, 오르막길을 오르기 힘든 것처럼 유체입자의 입장에서도 양의 압력구배를 만나면 거슬러 나아가기가 힘들다고 생각할 수 있다. 덧붙여, 스핀업의 경우에는 유체혼합이 매우 활발한 것으로 나타나고 있다($t=18, 20$).

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건에서 실시한 유동 가시화 실험의 결과이다. $t=10$ 까지는 Fig. 5 및 Fig. 2, 3에서 보인 거동과 거의 같다. $t=12$ 의 시점부터는 약간씩 비대칭의 형태를 보인다. 실험을 수차례 수행하였으나 비대칭의 모양이 매번 유사하게 나타나는 것으로 보아 이는 오리피스의 정렬 오차 때문이 아닌가 추측되고 있다. 실험 결과에서도 오리피스로부터 유입된 유체입자들은 회전영역을 침입하지 못하고 비회전 영역에서만 머무르고 있음이 앞의 수치해석 결과와 일치한다.

4.3 배경회전이 있는 경우

이제는 강제회전의 경우 즉 배경회전이 있는 경우의 결과를 제시한다. 배경회전의 경우에는 수심을 앞보다 더 깊게 하여 $h=7.2$ 로 하였으며 레이놀즈 수도 약간 더 높게 $Re=750$ 으로 하고 로스비 수는 $\varepsilon=3$ 으로 정하였다. Fig. 7은 이 경우에 대한 수치해석 결과이다. 그림에서는 제시하지 않았지만 $t=6$ 까지는 배경회전이 없는 상태와 유사한 거동을 보인다. 그러나 이후는 배경회전이 없는 결과와 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 배경회전은 유체의 수직 방향 운동을 억제하기 때문에 보텍스 링은 수면까지 이동하지 못하고 도중에 정지한 상태에서 상하로 늘어지는 변형을 하고 있다. 또한 1차 보텍스 링의 아랫 쪽에서 2차 링이 형성되는 것도 앞과는 완전히 다른 양상이다. 2차 링은 분출 제트의 전단층이 국소적으로 바깥으로 튀어나오면서 그로 인한 불안정성 때문에 발생된다. 특히 중심부에서의 유체가 상부로 이동하지 않고 오히려 아래로 내려오는 모양을 확인할 수 있는데, 이는 유입 제트의 바깥 쪽 영역이 관성좌

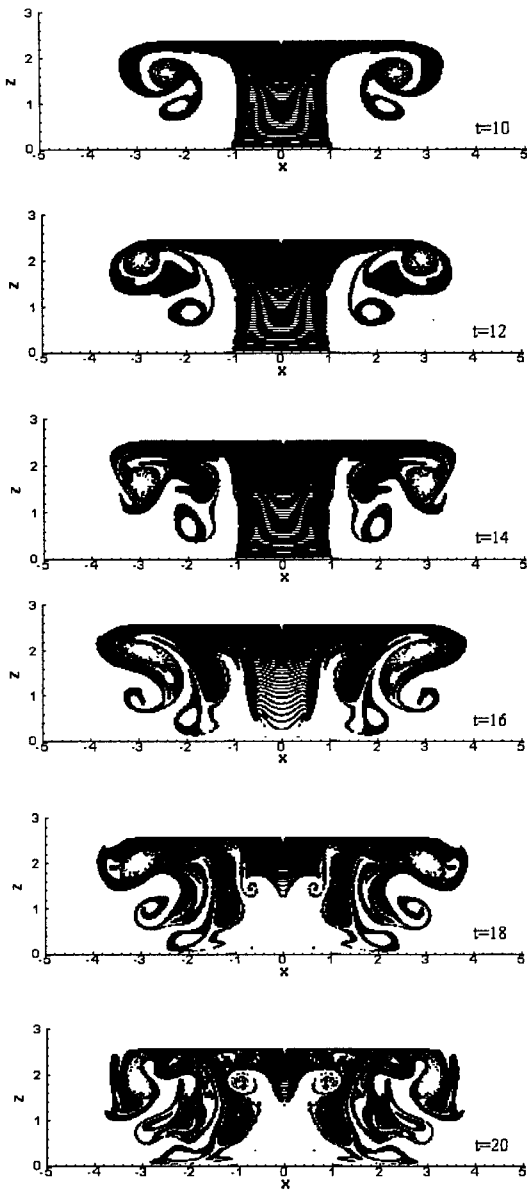


Fig. 5 Numerical result for the spin-up-flow case with $Re = 594$, $\varepsilon = 1.7$, $h = 2$, $t_s = 80$, $t_f = 95$, $I \times J = 121 \times 61$

표계에서 보았을 때 배경회전에 의한 스윌보다 더 큰 스윌을 가지고 이로 인해 중심 축 영역에서의 압력이 떨어지기 때문이라 생각된다.

배경회전이 있는 경우에는 Fig. 7 과 같은 조건에서 3 차원 수치해석도 수행하였다. 원주방향으로는 시간적으로 암시적 방법(implicit method)을 적용하여 중심에서 격자간격이 작아짐에 따른 수치해석적 불안정성 문제를 해결하였으며, 격자수는

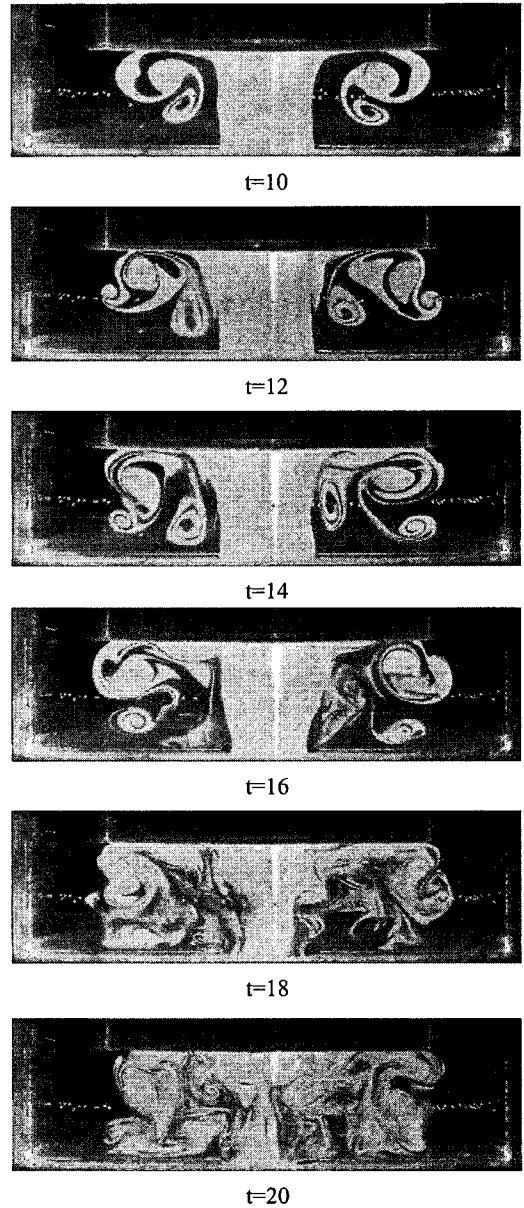


Fig. 6 Result of the flow visualization with the same parameter set as in Fig. 5

$I \times J \times K = 53 \times 65 \times 53$ 으로 하였다. 계산결과에 의하면 원주방향으로의 유동불안정성은 나타나지 않았으며, 원주방향으로 작은 섭동을 임의적으로 주었지만 결과는 마찬가지였다. 그리고 축단면 상의 유동장은 축대칭으로 하여 계산한 결과와 완전히 동일하게 나타났다. 3 차원 계산에 소요되는 시간은 2 차원에 비하면 엄청나게 많고 또 본 연구의 목적이 유동불안정성의 추구에 있는 것이 아니기 때문에 더 높은 레이놀즈 수나 로스비 수의 변화

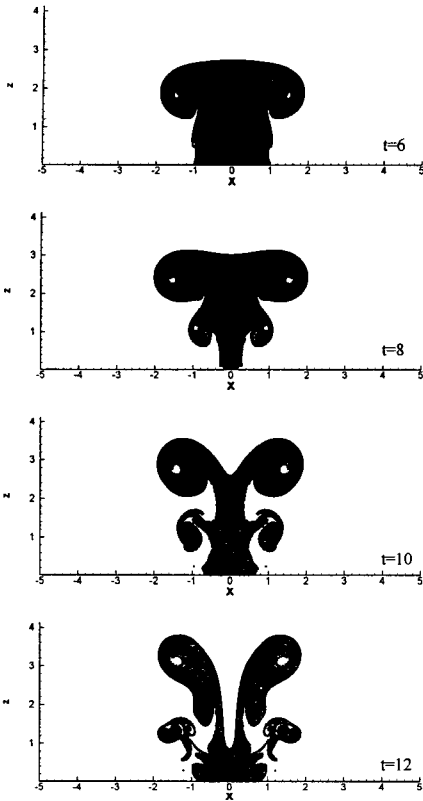


Fig. 7 Numerical result for the case of solid-body rotation with $Re = 750$, $\varepsilon = 3$, $h = 7.2$, $t_s = 0$, $t_f = 6$, $I \times J = 121 \times 201$

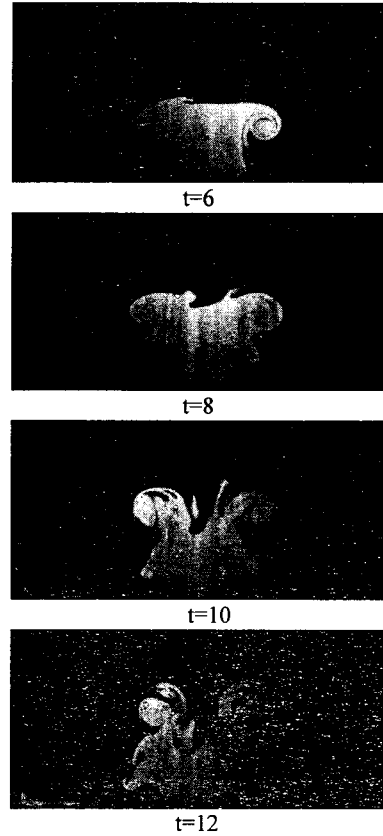


Fig. 8 Result of the flow visualization with the same parameter set as in Fig. 7

에 따른 이러한 특성의 분석은 추후의 연구과제로 남겨두기로 하였다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 실시한 유동가시화 실험의 결과이다. 1차 링에 이어서 2차 링이 아랫 쪽의 제트 전단층에서 형성되는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 7과 비교해 볼 때 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있다. 다만 강제회전의 경우에는 회전하는 과정에서 제트 분출 바로 전에 상부 원통과 중앙부 원통 사이의 원판형 칸막이를 제거하면서 유동에 교란을 주기 때문에 그림과 같이 정밀도가 다소 떨어진 보텍스가 형성된다. 덧붙여, 강제회전의 경우 오리피스 정렬과 관련한 정밀도가 보텍스의 비대칭화에 기여한다는 Verzicco 등⁽²²⁾의 연구보고를 고려하면 Fig. 8에서 나타난 비대칭이 오리피스의 정렬오차에서 비롯된다고도 볼 수 있다.

Fig. 9는 혼합액의 유입면 즉 오리피스에서의 속도성분의 분포의 시간변화를 그래프로 그린 것이다. 그림을 보면, 유입구에서의 스월 성분이 시간과 더불어 서서히 증가하는 모양을 확인할 수

있다. 이처럼 스월 속도가 시간과 더불어 서서히 증가하는 이유는 중앙부 원통에서 유체가 상승하여 오리피스를 향할 때 유체입자들이 축방향으로 모여들면서 각운동량 보존의 원리에 의해 원주속도 성분이 증가하기 때문이다.

오리피스에서의 이러한 스월성분의 영향은 의외로 크다. Fig. 10은 고의적으로 오리피스에서의 스월성분을 0으로 만들어 수치해석하였을 때의 결과로서 Fig. 7과는 판이하게 다른 양상을 확인할 수 있다. 스월성분이 없기 때문에 유체는 곧게 위로 상승하고 중심 축 근처에서의 하강형상도 나타나지 않고 있다. 또한, 2차 링의 형성도 거의 보이지 않고 있다. 한편, 이와 같이 실제적으로 매우 중요한 입구 스월의 영향에 대해서 Verzicco 등⁽²²⁾은 전혀 언급하지 않았다. 물론 보텍스 링을 피스톤-실린더의 방법으로 만들면 이러한 문제는 부분적으로 사라질 것이나 본 연구와 Verzicco 등⁽²²⁾에서 채택한 오리피스의 방법에서는 필히 나타나는 현상으로서 실험결과와의 양호한 매칭을 위해서는 반드시 고려해야만 하는 사항이다.

5. 결론

본 연구에서는 점성 유체가 담긴 원통 용기 내에 회전축과 나란한 방향으로 제트를 분출시켰을 때 형성되는 보텍스의 거동을 수치해석과 가시화실험을 통해 살펴 보았으며, 그 결과 얻어진 중요한 몇 가지 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 오리피스로부터 제트를 분출시켜 보텍스 링을 형성시키는 경우, 유입 관로 내의 관성과 관마찰의 영향을 고려할 필요가 있으며, 또한 배경회전의 경우에는 입구에서의 스윙 조건이 보텍스의 형성과 거동을 결정짓는 매우 중요한 인자로 작용한다

(2) 상부 자유표면에서의 경계조건은 자유표면을 매우 청정한 상태로 유지할 수 없는 경우에는 점착 조건으로 하는 것이 실험결과와 잘 맞는 결과를 주며, 무응력 조건으로 설정하면 실험결과와 현저히 다른 결과를 준다.

(3) 스핀업 과정에서 제트를 분출시킨 결과 회전 영역과 비회전 영역 사이의 경계면에 도달하기 전까지는 보텍스의 거동이 정지상태의 경우와 거의 동일하지만 그 이후는 보다 복잡한 거동을 보이며, 특히 1 차 링이 경계면을 거슬러 나아가지 못하고 경계면 근처에서 머무는 특이한 현상을 관찰하였다.

(4) 강제회전의 경우, 배경회전의 효과로 인해 보텍스의 활동은 상당히 위축되며, 배경회전이 없는 경우에 볼 수 있는 전형적인 보텍스 발달의 현상보다는 아래 위로 늘어나는 거동을 주로 보인다.

후 기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-041-D20080)

참고문헌

(1) Julien, K., Legg, S., McWilliams, J. and Werne, J., 1999, "Plumes in Rotating Convection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 391, pp. 151~187.
 (2) Bush, J.W.M. and Woods, A.W., 1999, "Vortex Generation by Line Plumes in a Rotating Stratified Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 388, pp. 289~313.
 (3) Shusser, M. and Gharib, M., 2000, "A Model for Vortex Ring Formation in a Starting Buoyant Plume," *J. Fluid Mech.*, Vol. 416, pp. 173~185.
 (4) Kumagai, I., 2002, "On the Anatomy of Mantle Plumes: Effect of the Viscosity Ratio on Entrainment

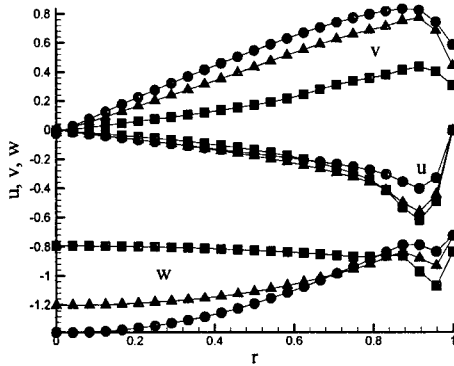


Fig. 9 Distribution of the three velocity components at the orifice for the case with the same parameter set as in Fig. 7: squares; $t = 2$, deltas; $t = 4$, circles; $t = 6$

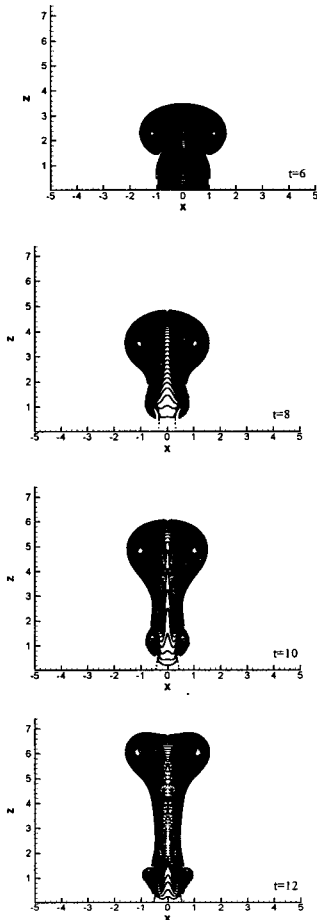


Fig. 10 Numerical result for the case with the same parameter set as in Fig. 7 but with no swirl at the inlet orifice

- and Stirring," *Earth and Planetary Sci. Lett.*, Vol. 198, pp. 211~224.
- (5) Kopiev, V.F. and Chernyshev, S.A., 1997, "Vortex Ring Eigen-Oscillations as a Source of Sound," *J. Fluid Mech.*, Vol. 341, pp. 19~57.
- (6) Shariff, K. and Leonard, A., 1992, "Vortex Rings," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 24, pp. 235~279.
- (7) Heeg, R.S. and Riley, N., 1997, "Simulations of the Formation of an Axisymmetric Vortex Ring," *J. Fluid Mech.*, Vol. 339, pp. 199~211.
- (8) Wakelin, S.L. and Riley, N., 1997, "On the Formation and Propagation of Vortex Rings and Pairs of Vortex Rings," *J. Fluid Mech.*, Vol. 332, pp. 121~139.
- (9) Gharib, M., Rambod, E. and Shariff, K., 1998, "A Universal Time Scale for Vortex Ring Formation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 360, pp. 121~140.
- (10) Mohseni, K., Ran, H. and Colonius, T., 2001, "Numerical Experiments on Vortex Ring Formation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 430, pp. 267~282.
- (11) Nitsche, M., 2001, "Self-Similar Shedding of Vortex Rings," *J. Fluid Mech.*, Vol. 435, pp. 397~407.
- (12) Shusser, M., Gharib, M., Rosenfeld, M. and Mohseni, K., 2002, "On the Effect of Pipe Boundary Layer Growth on the Formation of a Laminar Vortex Ring Generated by a Piston/Cylinder Arrangement," *Theoret. Comput. Fluid Dyn.*, Vol. 15, pp. 303~316.
- (13) Allen, J.J. and Auvity, B., 2002, "Interaction of a Vortex Ring with a Piston Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 465, pp. 353~378.
- (14) Cater, J., Soria, J. and Lim, T.T., 2004, "The Interaction of the Piston Vortex with a Piston-Generated Vortex Ring," *J. Fluid Mech.*, Vol. 499, pp. 327~343.
- (15) Dazin, A., Dupont, P. and Stanislas, M., 2004, "Experimental Observation of the Straining Field Responsible for the Vortex Ring Instability," *C. R. Mecanique*, Vol. 332, pp. 231~236.
- (16) Mansfield, J.R., Knio, O.M. and Meneveau, C., 1999, "Dynamic LES of Colliding Vortex Rings Using a 3D Vortex Method," *J. Comput. Phys.*, Vol. 152, pp. 305~345.
- (17) Naitho, T., Banno, O. and Yamada, H., 2001, "Longitudinal Vortex Structure in the Flow Field Produced by a Vortex Ring Impinging on a Flat Plate," *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 28, pp. 61~74.
- (18) Liu, C.H., 2002, "Vortex Simulation of Unsteady Shear Flow Induced by a Vortex Ring," *Computers & Fluids*, Vol. 31, pp. 183~207.
- (19) Fleischer, A.S., Kramer, K. and Goldstein, R.J., 2001, "Dynamics of the Vortex Structure of a Jet Impinging on a Convex Surface," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 24, pp. 169~175.
- (20) Greenspan, H.P., 1968, *The Theory of Rotating Fluids*, Cambridge Univ. Press.
- (21) Eisenga, A.H., Verzicco, R. and Heijst, G.J.F., 1998, "Dynamics of a Vortex Ring Moving Perpendicularly to the Axis of a Rotating Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 354, pp. 69~100.
- (22) Verzicco, R., Orlandi, P., Eisenga, A.H.M., Heijst, G.J.F. and Carnevale, G.F., 1996, "Dynamics of a Vortex Ring in a Rotating Fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 317, pp. 215~239.
- (23) Ferziger, J.H. and Peric, M., 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer.
- (24) Suh, Y.K. and Yeo, C.H., 2004, "Movement of a Horizontal Vortex Ring in a Circular Cylinder," *Transactions B of the KSME* (in Korean), Vol. 28, No. 8, pp. 652~658.