

배경회전이 있는 싱크 유동의 이론 및 수치해석

서용권[†] · 여창호^{*}

Theoretical and Numerical Analysis of Sink Flows under a Background Rotation

Yong Kweon Suh and Chang Ho Yeo

Abstract. Theoretical and numerical studies are given to the sink flows within a rotating circular tank driven by the fluid withdrawal from a bottom circular hole. It was found that, when the upper free surface was set with no-slip boundary conditions, the Ekman boundary-layer develops not only above the bottom surface but under the top surface. The sink fluid is coming from the two Ekman layers, and the mass transfer from the bulk, inviscid region is dependent on the rotational speed. It is also remarkable to see that all the fluid gathered along the axis flows in a form of rapidly rotating fluid column having almost the same diameter as the bottom hole.

Key Words : Rotating Flows(회전유동), Sink Flow(싱크 유동), Ekman Boundary- Layer(Ekman 경계층)

1. 서 론

회전유동이란 유체 전체가 강체회전(solid-body rotation)하는 경우에 있어서 이러한 강체회전운동과는 약간 차이가 나는 유체운동(즉 상대운동)이 있는 경우를 일컫는다. 따라서 대부분의 회전유동에서는 강체회전 운동을 하는 좌표계 상에서 해석을 수행하며, 이에 따라 원심력, 코리올리스 힘(Coriolis force) 등이 나타나고, 또한 각운동량 보존원리에 따른 여러 가지 특이하고도 흥미있는 현상이 나타난다. 그 중 Taylor-Prouman 이론은 강체회전 효과가 충분히 큰 경우에 있어서 유체입자는 회전축 방향으로 이동하는 것이 매우 어렵고 또한 유동장은 회전축 방향으로는 거의 변하지 않는 즉 2차원적 성향을 가지게 된다. 따라서 영역 내의 어떠한 경계면에서 회전축 방향(앞으로는 수직 방향이라 일컬음)으로 유체를 흡입(suction)하거나 송출(blowing)한다면 어떠한 현상이 생겨날까 하는 점이 흥미를 줄 것으로 기대된다.

이러한 기본적인 의문점에 대한 해답을 추구하기 위해 유체역학 연구자들은 바닥으로부터 일정한 크기의 속도로 유체를 흡입하거나 송출하는 문제를 다루어 왔다. Wilson & Schryer⁽¹⁾는 회전하는 무한 평판과 정지한 무한 평판이 평행하게 놓인 경우 두 원판 사이의 회전유동을 대상으로 연구하였으며, 회전원판으로부터 흡입이 증가하는 경우 내부의 회전운동은 점점 강해져서 결국 회전원판보다 더 빠른 속도로 회전할 수 있음을 보여주었다. Hyun⁽²⁾은 무한 평판이 아닌 유한 평판의 경우에 있어서 정지 원판으로부터는 유체가 송출되고 회전 원판에서 흡입하는 경우에 대해 수치해석을 수행하였으며, 유한 평판의 경우에는 무한 평판과는 반대로 내부 유체의 원주방향 유동은 더욱 작아지는 경향이 있음을 보여주었다. Hyun and Kim⁽³⁾은 또한 앞과 같은 조건에서 이제는 정지 원판이 아닌 측면 벽으로부터 유체를 송출하는 경우에 대해 수치해석적 연구를 수행하였으며, 흡입의 증가와 더불어 내부 유체의 회전속도는 무한 평판처럼 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 흡입효과가 약한 경우에는 측면으로부터 송출된 유체가 상부의 정지원판으로 올라가서는 정지원판 가까이의 Ekman 경계층을 따라 축방향으로 흘러가다가 다시 회전원판 쪽

[†]동아대학교 기계공학부

E-mail : yksuh@daunet.donga.ac.kr

*동아대학교 대학원 기계공학과

으로 수직하향하는 흥미있는 결과를 제시하였다. 한편, Chew et al.⁽⁴⁾은 회전하는 얇은 원통 사이에서 바닥의 구멍으로부터 유체가 송출하고 측면 벽에서 흡입하는 경우에 대해 수치해석과 실험을 수행하였으며, 분출된 유체는 원판 근처의 Ekman 경계층을 따라서 반경방향으로 나아가는 현상을 관찰하였다.

그러나 바닥의 어떠한 구멍으로부터 유체가 흡입되는 경우에 대한 연구는 흔치않다. Mang et al.⁽⁵⁾은 자유표면을 가진 원형 탱크 내의 수직 측면에서 유체가 반경방향으로 유입되고 바닥의 구멍으로 흡입되는 경우에 대해 이론해석을 수행하였으며, 측면으로부터 반경방향으로 균일하게 유입되는 유체는 서서히 바닥 면 쪽으로 방향전환을 하고 어떠한 임계 위치에서는 모두 바닥의 Ekman 경계층을 통해서만 중심의 구멍 쪽으로 이동하는 현상을 제시하였다.

본 연구에서는 회전하는 원통 바닥의 중심에 있는 구멍으로부터 일정한 유량으로 연속적으로 유체를 흡입하는 경우에 발생하는 유동장에 대해 이론 및 수치해석을 통해 해를 구하여 유동양상을 밝히고자 한다. 또한 가시화 실험을 통해 이론 및 수치해석에서 예측된 유동의 정성적 특성을 확인하고자 한다. 이론 및 수치해석에서는 원통 내 유체의 깊이를 일정하게 유지한 상태에서 상부 표면을 점착조건으로 설정하였으며, 실험에서는 상부 표면이 자유표면으로 유지된 상태에서 하부 구멍으로 물이 흡입되는 만큼 수심이 내려가도록 하였다.

2. 이론 해석

Fig. 1은 본 연구의 대상으로서 각속도 Ω 로 회전하는 반경 r_0 의 원통 내에 동점성계수 v 의 유체가 있고 하부의 직경 d 의 구멍을 통해 유체가 배출되는 상황을 스케치한 것이다. 수심 H 는 일정하며, 상부 표면에서는 하부에서의 배출 유량과 동일한 유량으로 유체가 유입된다. 단, 실험에서는 상부 표면이 자유표면으로 되어 있어 시간과 더불어 수심이 낮아진다.

이 경우, 초기의 유동은 모든 지역에서 유체입자가 바닥의 구멍을 향해 집중되는 방사선 모양의 궤적을 보일 것으로 예측할 수 있다. 그리고 원통이 회전하지 않는 경우(즉 $\Omega=0$ 의 경우)에는 이러한 유동양상이 그대로 지속될 것이다. 그러나 배경회전이 있는 경우에는 이러한 단순한 유동양상은 Taylor-Proudman 이론에 의해 지속될 수 없다. 이러한 초기의 방사선

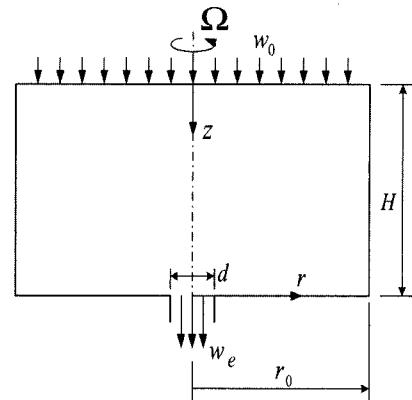


Fig. 1. Withdrawal of a viscous fluid from a rotating tank through a hole on the bottom wall.

형태의 흐름에서는 중심 축 방향의 반경방향 속도가 발생하고 이에 따라 각운동량 보존 원리에 의해 사이클로닉(cyclonic) 와류가 생겨난다. 그러면 상부 및 하부 벽면 근처에는 점착조건에 의해 Ekman 경계층이 생성된다. Ekman 경계층은 내부 즉 코어(core)와 상부 표면으로부터 유체를 흡입하며, 따라서 실제적으로 상부에서 투입된 유체 중 일부는 Ekman 경계층을 통해 중심 축으로 전달되고 일부는 내부로 전달된다. 한편 내부에 전달된 유체 중 일부는 중심 축 쪽으로 전달되고 나머지는 하부 벽면의 Ekman 경계층에 흡입되는 일련의 시나리오를 생각할 수 있다. 하부의 경계층은 물론 이 유체를 모두 중심의 회전축 쪽으로 전달한다.

상부 표면 근처의 Ekman 경계층에 대한 해석을 수행하기 위해 수직 좌표인 z 는 그 원점이 상부 표면의 중심에 있고 아래 쪽을 향하는 것으로 잡는다. 그리고 반경방향 r , 원주방향 θ , 및 축방향 z 의 해당 속도 성분을 각각 u , v , w 라 하면 충분히 큰 회전효과 하에서 선형화된 지배방정식은 아래와 같이 근사화 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$-2\Omega v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$2\Omega u = v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

경계조건은 $z=0$ 의 표면에서 점착조건이 적용되며 $w=w_0$ 이다. 그리고 Ekman 경계층 밖(즉 원통의 내부

비접성 영역에서는 u, v 가 유한한 값을 가져야 한다. 이와 동시에 축방향으로의 질량 보존의 법칙

$$(w_0 - w_1)\pi(r_0^2 - r^2) = -\int_0^\infty 2\pi r u dz$$

을 적용하면 아래와 같은 해를 구할 수 있다.

$$u = -\Delta w_0 \sqrt{\Omega/v} (r_0^2/r - r) e^{-\zeta} \sin \zeta \quad (4a)$$

$$v = 2\Delta w_0 \sqrt{\Omega/v} (r_0^2/r - r) [1 - e^{-\zeta} \cos \zeta] \quad (4b)$$

$$w = \sqrt{2} \Delta w_0 e^{-\zeta} \sin(\zeta + \pi/4) \quad (4c)$$

단, $\zeta = z\sqrt{\Omega/v}$, $\Delta w_0 = w_0 - w_1$ 이며 w_1 은 경계층 밖 즉 $z \rightarrow \infty$ 에서의 w 를 나타낸다. Δw_0 는 경계층으로 흡입되는 수직속도 성분의 양을 나타낸다.

그리고 하부 벽면에서의 경계층 유동의 해는 위 식에서 Δw_0 를 바닥 경계층의 흡입속도 w_2 로 치환하면 된다.

내부의 비접성 유동 영역에서의 원주방향 운동량 방정식은 충분히 큰 회전효과에 대해 아래와 같이 근사화할 수 있다.

$$u \left(\frac{1}{r} \frac{\partial rv}{\partial r} + 2\Omega \right) = 0 \quad (5)$$

이를 만족할 수 있는 경우는 반경방향 속도가 0이거나 ($u=0$) 아니면 원주방향 속도가 임의의 상수 C_1 에 대해

$$v = -\Omega r + \frac{C_1}{r} \quad (6)$$

의 형태가 되어야 한다. 후자의 경우에는 경계층 해 (4b)를 $z \rightarrow \infty$ 에서 산정한 결과와 맞출 수가 있고, 그로부터 $C_1 = \Omega r_0^2$ 및

$$\Delta w_0 = w_* = \sqrt{\Omega/2} \quad (7)$$

를 얻을 수가 있다. 여기서 w_* 는 상부 경계층으로 흡입되는 양을 나타낸다. 동일한 내부 유동에 대해 상부 경계층과 하부 경계층에서는 같은 양의 유체흡입이 이루어지므로 $w_2 = w_*$ 의 결과를 얻을 수 있다. 식 (6)으로 절대좌표계에서의 외도의 수직성분(즉 $\partial r(v + r\Omega)/\partial r$)을 구하면 0이 된다. 따라서 회전효과가 충분히

큰 경우에 내부의 비접성 유동은 절대좌표계에서 보았을 때 비회전성임을 알 수 있다.

한편, 내부의 비접성 영역에 대해 질량 보존의 법칙을 적용하면, 반경방향 속도 성분의 해

$$u = \frac{-(w_1 - w_2)}{2H} (r_0^2/r - r) \quad (8)$$

을 얻을 수 있다. 만약 w_1, w_2 및 w_* 의 크기가 모두 같은 오더(order)이고, H 와 r_0 도 서로 같은 오더의 크기를 가진다면

$$u = O(w_*), \quad v = O(w_* \sqrt{E})$$

의 결과를 얻을 수가 있다. 여기서 $E \equiv v/\Omega r_0^2$ 는 Ekman 수이다. 따라서 충분히 큰 Ekman 수에서 내부의 비접성 유동은 원주방향 속도성분이 반경방향 속도성분에 비해 월등히 큰 특징을 보인다.

종합해 보면, 상부 벽면을 통해 유입된 유체의 축방향 속도 w_0 는 Ekman 경계층을 지나면서 w_* 만큼 줄어들고 나머지는 코어로 전달된다. 한편, 하부 경계층에 흡입되는 축방향 속도도 w_* 이므로 코어를 통해 중심축으로 전달되는 유량은 속도 차이 $w_0 - 2w_*$ 만큼의 유량에 해당한다.

만약 w_0 가 $2w_*$ 보다 작을 때는 식 (8)에 의한 u 가 양이 되면서 물리적으로 그 발생이 불가능할 것이 예상되므로 식 (5)를 만족시키기 위한 또 다른 조건으로서 $u = 0$ 을 선택할 수밖에 없다. 그러면 내부 유동의 원주방향 속도성분은 각 경계층에서 $w_0/2$ 만큼의 흡입이 이루어지도록 정해질 것으로 예상할 수 있으며 그 결과에 따른 해는 아래와 같다.

$$v = w_* \sqrt{\Omega/v} (r_0^2/r - r)$$

다만, 이 경우에는 내부 유동이 절대좌표계에서 비회전성이 아니다.

또한, 위 해를 분석해 보면 원통 측면 $r = r_0$ 에서 u, v 는 모두 0이 되고, 중심을 갈수록 크기가 증가한다. w 는 표면 $z = 0$ 에서 최대가 된다. 그리고 표면 가까이의 수평 단면 상에서 유체입자의 궤적은 나선 모양을 그리며, 원주방향에 대한 나선각을 θ 라 할 때 $\tan \theta = -(\partial u / \partial \zeta) / (\partial v / \partial \zeta)_0$ 의 관계로부터 $\tan \theta = 1/2$ 또는 $\theta = 26.6^\circ$ 의 결과를 얻을 수 있다. 한편 비접성 유동 영역에서의 나선각은 이보다 훨씬 작은 값이 될 것

이다.

지금까지 제시한 이론적 해는 물론 중심 축 부근에서 특이성을 보이므로 실제와 맞지 않다. 중심 축 부근에서는 원주방향 유속이 r 과 더불어 선형적으로 증가하는 모양을 보일 것으로 예측되며, 또한 축방향 유속은 경우에 따라서는 역류를 일으킬 수도 있다고 판단된다. 중심 축 부근의 영역까지 예측할 수 있는 종합적인 이론해를 구하는 일은 추후의 과제로 남겨둔다.

3. 수치해석 및 실험

본 유동에 대한 3차원 수치해석을 상용 코드 CFX로 수행하였다. 하부의 배출부는 수심과 같은 길이만큼 관을 덧붙인 것으로 하여 해석함으로써 안정한 결과를 얻을 수 있었다. 상부 벽면의 경계조건은 앞의 이론해석과 동일하게 설정하였다. 격자망은 사면체 모양의 구조로 하여 약 50만개의 셀로 구성하였다. 그리고 상하부 표면 근처에서는 얇은 Ekman 경계층을 염두에 두어 보다 세밀한 격자계를 구성하였다.

상부 표면의 움직임을 제외하면 파라미터 값들은 실험과 동일하다; 즉, $r_0 = 12.5 \text{ cm}$, $d = 2.5 \text{ cm}$, $H = 12 \text{ cm}$, $w_e = 4.7 \text{ cm/s}$, $\Omega = 0.39 \text{ rad/s}$ 이다. 이 때 배출구 직경과 배출 속도를 기준으로 한 레이놀즈 수는 2340이며, Rossby 수($=w_e/r_0\Omega$)는 0.96이다. 계산을 위한 시간간격은 0.01s부터 시작하여 서서히 증가시켜 최종적으로는 0.2s로 하였으며 50s 까지 계산을 수행하였다.

실험은 회전테이블 위에 원형의 물탱크를 놓고 하부의 구멍으로부터 중력에 의해 물을 빼내는 방법을 사용하였다. 상부 자유표면에는 물을 공급하지 않았기 때문에 수심은 시간과 더불어 서서히 감소한다. 중심축 단면을 가시화하기 위한 레이저 광은 회전 테이블 밖의 장소에 고정시켰고, 테이블의 회전 중심과 광의 축이 일치하도록 조정할 수 있는 특수제작 장치에 설치하였으며, 평면광으로 만들기 위한 원통형 렌즈는 회전 테이블 위에 설치하였다. 회전에 따른 레이저 광의 위치편자는 약 1 mm 이내가 되도록 하였다. (실험장치 추가)

4. 수치/이론해석 및 실험 결과와 검토

Fig. 2는 축단면 상에서의 2차원 유동을 나타내는

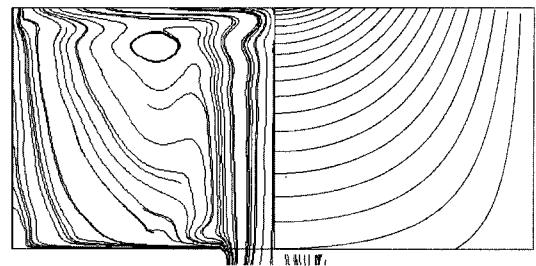


Fig. 2. Numerical (L.H.S.) and theoretical (R.H.S.) streamlines at $t=50 \text{ s}$.

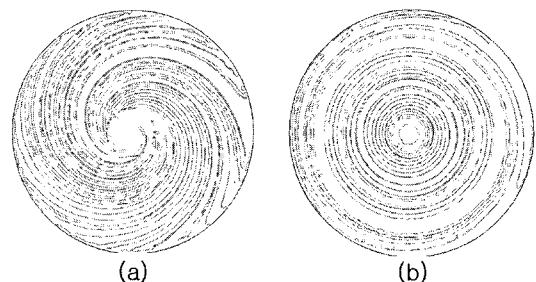


Fig. 3. Numerical streamlines on the horizontal plane (6cm from the bottom) after (a) 2 and (b) 20 s from starting of fluid withdrawal.

전형적인 유선으로서 상용 CFD 코드로 구한 결과(좌측)와 중심부의 비점성 영역에 대한 이론해석 결과(우측)를 비교한 것이다. 수치해석 결과에 의하면, 하부 구멍을 통해 유출되는 유체의 상당한 부분이 상부 Ekman 경계층을 통해 이송된 유체이며, 중심부는 거의 수직 기둥의 모양으로 유체가 하강한다. 물론 거의 모든 영역에서 유체는 원주방향으로 회전하는 양상을 띠며, 특히 수직 기둥의 가장자리에서 원주 속도가 최대가 된다.

Fig. 3은 수치해석 결과로서 바닥으로부터 6 cm만큼 떨어진 수평 단면 상에서의 유선을 보여주고 있다. 앞에서 분석한 바와 같이 초기에는 유체 입자들이 중심축으로 모여들고(Fig. 3a), 시간이 충분히 지나면 유체는 거의 동심원 모양으로 회전하는 모양을 보인다(Fig. 3b).

Fig. 4는 수치해석 결과로서 유동이 충분히 발달된 30초 때의 수평단면 상의 속도벡터를 보이고 있다. 수심의 반 되는 단면에서는 흐름이 거의 원주방향임을 확인할 수 있다(Fig. 4a). 이러한 속도벡터의 분포는 상하부 벽면 근처의 Ekman 경계층을 제외한 대부분의 영역에서 동일하다. 다만, 하부로 내려갈수록 중심

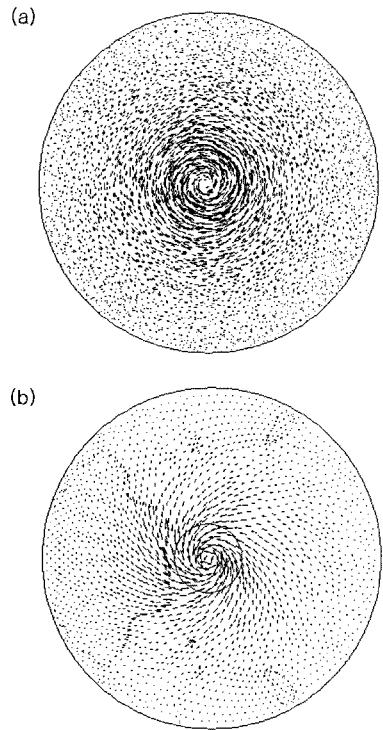


Fig. 4. Numerical results showing the velocity-vector distributions on the horizontal plane at the height (a) 6 cm and (b) 11.7 cm from the bottom after 30 s from starting of fluid withdrawal.

축 근처의 회전유동이 점점 더 빨라진다. 한편, Fig. 4(b)에서 보인 분포는 자유표면 근처의 Ekman 경계층 내의 속도벡터 분포로서 모든 지점에서 유동은 회전 중심축을 향하는 성분을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 상부 표면을 통해 유입된 상당한 양의 유체가 상부 표면의 얇은 Ekman 경계층을 통해 중심부로 이송된다는 앞의 이론해석 결과와 일치한다.

Fig. 5는 등와도 곡면의 수치해석 결과를 나타내고 있다. 초기에는 상하 표면 근처의 Ekman 경계층에서 만 속도의 구배가 심하다(Fig. 5a). 이는 중심부의 수직 기둥의 형성보다는 Ekman 경계층의 형성이 더 조기에 이루어진다는 것을 의미한다. 시간이 지나면 (Fig. 5b) 중심부에서도 수직 기둥 근처에 강한 전단류의 형태가 나타나고 있다.

Fig. 6은 압력분포의 수치해석 결과이다. 초기에는 출구 관에서만 상대적으로 낮은 압력이 형성되고 있으며 (Fig. 6a) 이는 초기 유동이 바닥의 구멍을 향하는 형태이며 아직 내부에 스월(swirl)이 미처 형성되

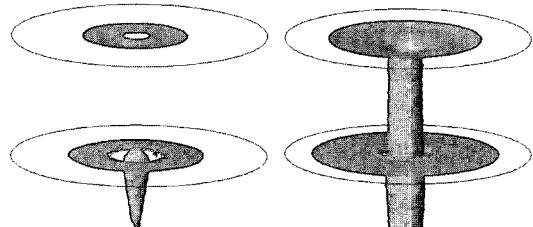


Fig. 5. Numerical results of the equi-vorticity surface (vorticity = 5/s) after (a) 10 and (b) 30 s from starting of fluid withdrawal.

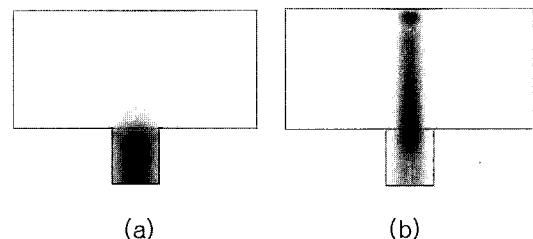


Fig. 6. Numerical results for the pressure distributions on an axial plane after (a) 5 and (b) 30 s from starting of fluid withdrawal. In (a) pressure ranges from -0.1 to 3.3 Pa, and in (b) it varies from -5.5 to 8.8 Pa.

지 않음을 나타내는 것이다. 충분한 시간이 지난 다음에는 (Fig. 6b) 수직 기둥 전체가 낮은 압력의 분포를 보이고 있으며, 이는 수직 기둥에서 형성되는 강한 스월 유동이 지배적임을 의미한다.

Fig. 7은 수치해석 결과로서 반경 6 cm의 지점에 놓인 수직 라인 상에서의 속도벡터의 분포를 보여주고 있다. 상하 벽면 근처의 Ekman 경계층에서는 전형적인 Ekman 와류(spiral)-분포가 나타나고 있으며 상부 표면 뿐만 아니라 하부 표면 근처에서도 유동은 중심 축을 향하고 있음을 알 수 있다. 이는 상부뿐만 아니라 하부 벽면 근처의 경계층을 통해서도 상당한 양의 반경방향 유체이송이 이루어진다는 앞의 이론해석 결과와 일치한다.

Fig. 8은 유동가시화 실험의 결과로서 바닥으로부터 6 cm 떨어진 수평 단면 상에서의 유동양상을 보여주고 있다. 초기에 (Fig. 8a) 밝은 색의 줄무늬가 중심부를 향하는 양상이 관찰되고 있는데 이는 그 때까지 중심부를 향하는 유동이 만들어낸 유체입자의 변형결과로서 순간적인 유동양상과는 다르다. 실제로

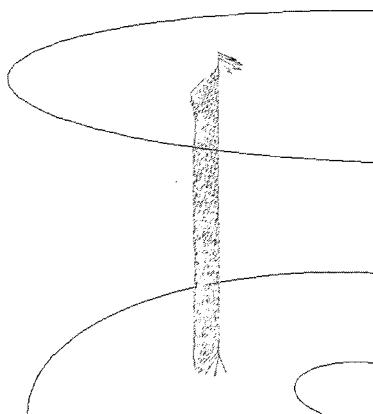


Fig. 7. Numerical result for the distribution of the velocity vectors along a vertical line after 30 s from starting of fluid withdrawal.

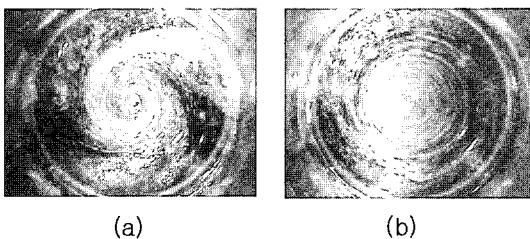
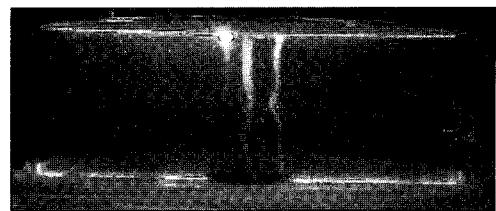


Fig. 8. Flow visualization of a horizontal plane (6 cm from the bottom) after (a) 20 and (b) 60 s from starting of fluid withdrawal.

관련 부위를 확대해서 보면 입자의 순간 궤적은 Fig. 8(b)와 같이 동심원에 가까운 형태를 띠고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 시간이 충분히 경과한 뒤에는 입자의 순간적인 흐름뿐만 아니라 물질의 변형도 동심원 형태로 나타나고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9는 회전중심축을 지나는 수직의 축단면에서 유동을 가시화한 실험 결과이다. Fig. 9(a)는 실험 시작 후 70초 경과한 시점에서의 순간유동의 모양이며 Fig. 9(b)는 그 시점 전후의 영상을 겹친 결과로서 중심부의 시간평균적 흐름을 보기 위한 것이다. 중심부에 수직기둥 모양의 하향 유동양상이 뚜렷이 나타나고 있음이 앞에서 제시한 수치해석 결과와 일치한다. 또한 특이한 것은 Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 수직 기둥의 가장자리에 3-4개의 작은 와류가 형성된다는 것이다. 이 와류는 처음 자유표면 근처에서 생성되고 이후 아래쪽으로 꼬리를 길게 내리는 형태로 바뀐다. 이 와류들의 회전방향은 좌표계의 회전방향과 일치한다(즉 사이클로닉 와류(cyclonic vortex)이다). 그러나



(a)



(b)

Fig. 9. Flow visualization of an axial plane after 70 s from starting of fluid withdrawal. (a) is an instantaneous view and (b) is superposition of several shots.

수치해석에서는 이 와류가 관찰되지 않았다. 앞으로 더욱 정밀한 수치해석을 통해 이 와류를 재생할 필요가 있으며, 이를 와류의 생성 메커니즘과 더불어 태풍이나 허리케인의 생성과 어떠한 연관이 있는지 연구할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 회전하는 원통형 용기 내의 물이 용기 바닥의 구멍을 통해 배출되는 경우, 내부 유동의 양상이 어떻게 달라지는지, 그리고 궁극적인 유동양상은 어떠한지를 밝히기 위한 목적으로 수행되었다. 본 연구를 통해 도출된 몇 가지 결론을 요약하면 아래와 같다.

(1) 배출 시작 후 초기에는 회전효과가 없는 경우와 같이 내부 유체는 구멍을 향에 집중하는 방사선 모양의 유동양상을 보인다.

(2) 시간이 충분히 지나면 회전 중심축 둘레로 바닥의 구멍과 거의 같은 크기로 수직 기둥이 형성되며 유체는 주로 이 기둥에서 회전하면서 아래로 흘러가는 양상을 보인다.

(3) 이론 해석의 결과는 수치해석 및 유동가시화 실험의 결과를 정성적으로 잘 예측하고 있다.

(4) 실험 결과에 따르면 수직 기둥의 가장자리에 작

은 보텍스가 3-4개 형성되며 이 보텍스의 회전방향은 전체 시스템의 회전방향과 일치한다.

후 기

이 논문은 동아대학교의 2003년도 교비지원 교수국외단기 연구파견 지원 프로그램에 의해 수행되었음

참고문헌

- 1) Wilson, L.O. and Schryer, N.L., 1978, "Flow between a Stationary and Rotating Disk with Suction", *J. Fluid Mech.*, Vol. 85, pp. 479-496.
- 2) Hyun, J.M., 1985, "Flow Driven by a Finite, Shrouded Spinning Disk with Suction", *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, pp. 766-770.
- 3) Hyun J.M. and Kim, J.W., 1987, "Flow Driven by a Shrouded Spinning Disk with Axial Suction and Radial Inflow", *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 2, pp. 175-182.
- 4) Chew, J.W., Owen, J.M. and Pincombe, J.R., 1984, "Numerical Predictions for Laminar Source-Sink Flow in a Rotating Cylindrical Cavity", *J. Fluid Mech.*, Vol. 143, pp. 451-466.
- 5) Mang, J., Ungarish, M. and Schaflinger, U., 2001, "Gravitational-Centrifugal Separation in an Axisymmetric Source-Sink Flow with a Free Surface", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 197-215.