

## 축방향 유입과 반경방향 유출이 있는 회전용기 내의 유동해석

박준상<sup>†</sup> · 손진국<sup>\*</sup>

### Flow Analysis in a Rotating Container with Axial Injection and Radial Ejection

Jun Sang Park and Jin Gug Sohn

**Abstract.** An investigation has been made of a viscous incompressible flow in a circular cylindrical tank. The flow is driven by the spinning bottom disk of tank together with/without central injection and radial uniform-ejection through the sidewall. Numerical solutions of steady and unsteady flows to 3-dimensional Navier-Stokes equation were obtained for several cases of injection strength. In a moderate flow rate of injection, the mass transfer occurs through the boundary layers but, as the flow rate increases, the inner region far from the container walls takes part in mass transfer.

**Key Words:** Axial Injection(축방향 유입), Ekman layer(에크만경계층), Rotating Flow(회전유동), Radial Ejection(반경방향 유출), Stewartson layer(스티워슨경계층)

#### 1. 서 론

유체가 회전할 때 발생하는 문제는 자연계에서 흔히 볼 수 있는 현상으로 응용측면에서의 대표적인 예가 터빈, 팬, 원심펌프, 제트엔진 등의 터보기계에서 발생하는 유동이다. 이외에 지구나 별 내부의 마그마 운동, 해수 및 대기의 운동도 회전유동의 대표적인 예이고 반도체 산업에서 많이 쓰이는 웨이퍼의 원료인 실리콘 단결정성장, CVD, PVD 및 스펀코팅 공정 등도 회전유동 응용의 대표적인 예라 할 수 있다.

앞서 언급한 유동모델에 대한 기존 연구의 대부분은 밀폐된 용기 내에 동일한 회전축을 갖는 두 회전판이 존재하는 흔히 split disk problem으로 불리는 문제에 초점이 맞추어져 왔다. 한편, 연속공정으로 이루어지는 믹스나 원심분리기에서는 유체의 회전과 함께 용기 내로의 유체의 유, 출입을 동반하는 보다 복잡한 형태의 문제를 제공한다.

본 연구에서는 유체의 회전과 함께 유체의 유, 출입

이 있는 해석 모형에 대한 연구를 통해 유체의 유, 출입이 내부 유체의 회전운동에 미치는 영향을 조사했다. 실린더형 용기의 아래, 위 디스크가 회전하고 측벽이 정지하고 있는 상태에서 아래, 위 디스크의 측부근영역을 통해 유체가 유입되고 측벽을 통해 유출되는 경우에 유입, 유출 유동강도 변화에 따른 유동특성을 조사했다. 이 연구의 직접적인 배경은 Owen & Rogers<sup>(1)</sup>(1989) 그룹에서 가스터빈의 날개냉각 연구를 위해 다루어온 유동모형으로부터이다. 그러나 본 연구에서는 열전달 특성보다는 유동특성에 초점을 맞추었다.

본 연구와 연관된 기존연구를 살펴보면, Benton & Clark<sup>(2)</sup>(1974), Zandbergen & Dijkstra<sup>(3)</sup>(1987), Saffman<sup>(4)</sup>(1992), Duck & Foster<sup>(5)</sup>(2001) 등이 행한 회전유동에 대한 리뷰가 있다. 보다 구체적인 연구는 Owen & Rogers(1989)의 회전디스크 시스템에 대한 유동 및 열전달 연구가 있고, 유체의 유출입이 있는 경우의 회전유동 특성에 대한 Hide<sup>(6)</sup>(1968), Lundgren<sup>(7)</sup>(1985), Suh & Yeo<sup>(8)</sup>(2004) 등의 연구가 있다.

#### 2. 유동모형

본 연구에서는 높이  $2H$ , 반경  $R$ 을 갖는 원통용기 내

<sup>†</sup>한라대학교 기계자동차공학부  
E-mail : jspark@halla.ac.kr

<sup>\*</sup>한라대학교 기계자동차공학부

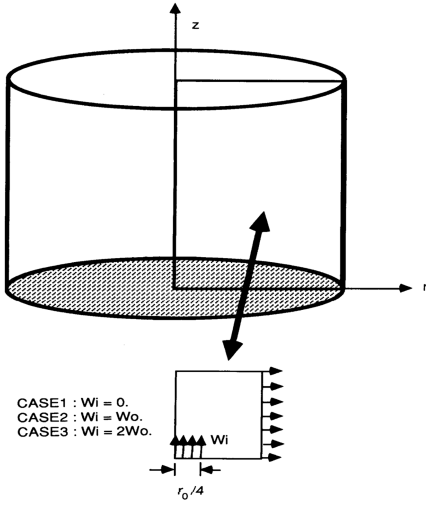


Fig. 1. Geometry of the problem.

부에 정지한 유체가 들어있는 경우를 생각하자. 원통 용기의 대칭축은 수직방향  $z$ -축이고, 반경방향은  $r$ -축이다(Fig. 1 참조). 유동은 아래, 위 원판이 갑자기 회전하면서 회전축 부근의 아래, 위 원판 일부(원판 반경의 1/4)를 통해 유체가 유입되고, 원통의 측벽을 통해 균일하게 유출되면서 발생한다. 이 유동모형은 터빈 블레이드의 냉각과 같은 터보머신의 냉각문제와 연계한 유동연구를 위해 Owen & Rogers(1989)에 의해 제시된 것이다. 이 문제는  $z=H$ 에 대해 대칭성을 갖기 때문에 해석은 아래쪽 영역( $0 \leq z \leq H$ )을 고려하는 것으로 충분하다.

문제를 간단히 하기 위해 용기의 종횡비를  $H/R=1.0$ 로 가정한다. 기준길이  $H$ , 기준속도  $\Omega H$ , 기준시간  $\Omega^{-1}$  그리고 기준압력  $\rho\Omega^2$ 로 유동변수를 무차원화한다. 그러면 초기의 유체와 용기는 정지한 상태이다. 이 때 용기의 아래 디스크판이 갑자기 회전, 즉,  $v=r$ 로 회전하면서, 아래판의 회전축 부근에서 축방향을 따라 회전판과 같은 속도로 회전하면서( $0 \leq r \leq 1/4$ ,  $z=0$ 에서  $w=w_i$ ) 형태의 수류가 용기 내부로 유입되고, 정지하고 있는 수직측벽을 통해 유입된 만큼의 유량이 균일하게 빠져나가는 유동( $r=1.0$ ,  $0.0 \leq z \leq 1.0$ 에서  $u=w_i/64$ )을 고려했다(Fig. 1 참조).

## 2.1 지배방정식

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(rw)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial r} + E \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = E \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + E \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 레이놀즈수의 역수인 무차원 에크만수  $E[=1/R_e]$ 는 다음과 같이 정의된다.

초기조건은

$$t=0.0 \text{ 에서 } u=w=0, v=0 \quad (5)$$

이고,  $t>0.0$ 일 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$r=1.0 \text{ 에서 } v=1, w=0, u=w/32; \quad (6a)$$

$$r=0.0 \text{ 에서 } u=\partial(v/r)/\partial r = \partial w/\partial r = 0; \quad (6b)$$

$$z=1.0 \text{ 에서 } \partial u/\partial z = \partial v/\partial z = w=0; \quad (6c)$$

$$z=0 \text{ 에서 } u=0, v=r, w=w_i \quad (0 \leq r \leq 0.25); \quad (6d)$$

$$u=0, v=r, w=0 \quad (0.25 < r \leq 1.0). \quad (6e)$$

위 식에서 유출, 유입과 경계층간의 상호작용을 고려하기 위해 유입속도가  $w_i \sim O(E^{1/2})$ 로 매우 작은 경우를 가정한다. 본 연구에서는 유입속도의 크기에 따른 유동특성 분석을 위해 3가지 경우의 유입속도

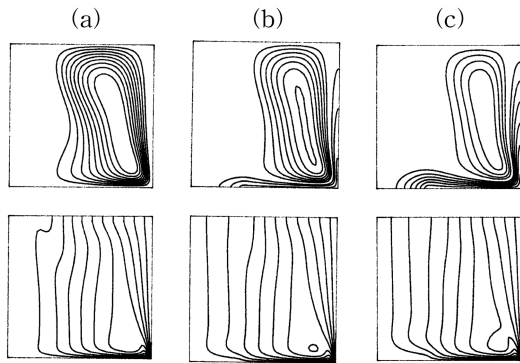
$$w_i = (i-1)w_0, \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

에 대해 분석했다. 여기서  $w_0=0.05 \sim O(E^{1/2})$ 이다.

## 2.2 수치해석

본 연구에서는 축대칭 회전유동문제의 해석에 널리 활용되어 왔고, 정확성 및 유용성에 대해서는 이미 검증된 코드인 Patankar & Spalding 그룹에서 개발한 EL2D code를 사용했다(Patankar<sup>(9)</sup>(1980)). 이 코드는 SIMPLER 알고리즘을 바탕으로 시간차분에 대해서는 내재법(implicit method), 대류항은 상류차분(upwind difference), 확산항은 중앙차분(central difference)으로 처리한 것이다.

수치해석을 위한 격자계는 그리드민감성에 대한 여러 번의 테스트를 거쳐  $65 \times 65$ 의 격자계를 채택했다. 그리고 경계층 내에는 5개의 그리드를 배치할 수 있게 (본 연구에서 사용한 에크만수  $E=10^{-3}$ 에 대해 에크만



**Fig. 2.** Steady state streamlines(top) and contours of azimuthal velocities(bottom) ( $E = 10^{-3}$ ). Injection velocity,  $w_i$ , are : (a) 0; (b) 0.05; (c) 0.1.

경계층의 두께는  $O(E^{1/2}) \sim 0.0316$  정도이다), 용기벽 쪽으로 그리드를 밀집시킨 비균일 격자를 사용했다.

### 3. 유동해석

#### 3.1 정상유동

Fig. 2는 용기벽을 통한 유체의 유출입 강도에 따른 유동모습을 보여주고 있다. 아래판이 회전하고 측벽이 정지하고 있는 경우에 대해 자오면(meridional plane) 상에서의 유선(streamline)[상], 회전방향속도( $v$ )[하]를 보여준다.

먼저 용기벽을 통한 유체의 유출입이 없는 경우(Fig.2(a))를 살펴보면 아래 원판의 회전효과가 유체 점성에 의한 확산작용에 의해 아래원판 근처 유체의 회전속도를 증가시키고 이로 인해 발생한 원심력효과에 의해 아래원판근처 유체의 반경바깥방향 운동을 발생시켜 유동장 전체적으로는 반시계방향의 순환유동이 일어난다(Fig.2(a)). 이때 흔히 에크만경계층(Ekman boundary layer)이라 부르는 유체의 점성에 의해 발생하는 회전원판 근처의 전단층(shear layer)은 스토크스 첫 번째 문제(Stokes first problem)로 알려진 무한평판의 갑작스런 일방향 평행운동에 의해 발생하는 레일레이 전단층(Rayleigh shear layer)과 유사한 측면을 가진다. 그러나 스토크스 유동에서 발생하는 전단층의 두께는 시간이 지남에 따라 운동의 수직방향으로 무한히 커지는데 반해, 에크만 경계층의 경우 에크만 경계층을 통한 반경바깥방향 (+ $r$  방향)으로 밀어내는 유동이 내부유동과 만나는 에크만 경계층 경계에서 수직아래

방향(- $z$  방향)의 흔히 에크만 펌핑(Ekman pumping)이라는 속도를 유발시켜 회전판으로부터 수직위쪽방향(+ $z$  방향)으로 전달되는 확산효과를 상쇄시키기 때문에 확산효과가 위로 무한히 전달되지 않게 하여 점성효과가 회전판 근처의 일정두께  $O(E^{1/2})$ 에 머무르게 한다. 결과적으로 점성의 효과는 회전판 근처 두께  $O(E^{1/2})$ 의 에크만경계층에만 나타나고, 회전판에서 먼 내부영역( $z > O(E^{1/2})$ )은 비점성유동영역 특성을 보이게 된다. Fig. 2(a)에서 상대적으로 회전판과 측벽으로부터 먼 영역에서 회전속도가 축방향으로 일정한

$$\frac{\partial v}{\partial z} \approx 0$$

의 특성을 관찰 할 수 있다. 이것은 유체가 회전할 때 비점성영역에서 발생하는 일반적인 특성으로 Taylor-Proudman 기둥으로 알려진 현상이다(Greenspan<sup>(10)</sup> (1968)).

한편 수직측벽부근에서의 유동을 살펴보면 내부 비점성영역의 회전속도가 자동으로 측벽의 회전속도와 matching이 되기 힘들기 때문에 내부비점성영역의 회전속도와 측벽의 회전속도를 matching하기 위한 경계층이 발생한다. Stewartson<sup>(11)</sup>(1957)의 선형이론에 의하면 이 경계층의 두께는  $O(E^{1/2})$ 로 알려져 있고, 현재 회전유동에서 발생하는 회전축에 평행한 이 경계층을 Stewartson 경계층이라 부른다. Fig. 2(a)의  $v$ -속도에 대한 등속선의 형태를 살펴보면 회전판근처의 Ekman 경계층이 두께  $E^{1/2} \sim 0.03$ , 원통측벽 근처의 Stewartson 경계층이 두께  $E^{1/4} \sim 0.18$ 의 크기를 정성적으로 잘 보여주는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 비선형 문제에서도 선형이론의 결과가 정성적인 측면에서 여전히 유효함을 알 수 있다. 여기서 선형이라는 의미는 아래판의 회전속도와 원통측벽의 회전속도의 차이가 매우 작은 경우, 즉, 아래판이  $\Omega$ 로 회전할 때 측벽은  $(1-\epsilon)\Omega$ 로 회전하고  $\epsilon \ll 1$  인 경우를 의미한다. 본 연구의 문제는  $\epsilon = 1.0$ 인 경우로 완전한 비선형 경우이다.

해석결과로부터 하나 지적해야 할 사항은 Stewartson 경계층에서의 회전속도 프로파일이 선형이론의 그것과 달리 회전축에 더 이상 평행하지 않다는 사실이다. 이것은 Ekman 경계층을 따라 수평으로 이동해온 유체가 측벽을 만나면서 수직방향으로 방향을 바꾸는 영역인 ( $r=1.0, z=0.0$ ) 근처의 코너영역 유선에 대한 그림으로부터 설명할 수 있다. Fig. 2(a)[상]을 살펴보면 비선

형 문제( $\epsilon = 1.0$ )의 경우 수평경계층(Ekman layer)을 따라 반경방향으로 밀려난 유체가 코너영역에서 방향을 바꾸어 수직경계층(Stewartson layer)를 따라 올라가는 과정에서 유동이 원통의 측벽을 따라 평행하게 수직방향으로 이동하지 않고 반경안쪽으로 기울어진 형태의 운동을 보인다. 비선형 문제의 경우 Ekman 경계층을 따라 코너로 들어올 때 유동강도가 상대적으로 강하기 때문에 정체점( $r=1.0, z=0.0$ )에서 발생하는 정체압이 매우 커지게 되고 이로 인해 코너영역에서의 유동이 정체압의 영향을 받아 마치 코너에서 리바운드되는 형태의 코너제트와 유사한 운동을 보이게 되고 결과적으로 반경안쪽으로 기울어지면서 수직방향운동을 하는 유동특성을 보인다는 것을 알 수 있다. Veronis<sup>(12)</sup>(1970)에 의해 밝혀진 자연대류 문제에서도 이와 유사한 현상은 일반적으로 관찰되는 특성이다 (Patterson & Imberger<sup>(13)</sup>(1972)). 속도의 제곱에 비례는 정체압의 영향은 선형이론에서 다루는 최저차방정식에서는 무시된다. 따라서 선형이론의 결과는 상기의 현상을 설명하는데 부적절한 것으로 보인다.

이제 유입, 유출수류의 강도에 따른 유동특성을 살펴보자. Fig. 2에서 볼 수 있는 유입, 유출강도의 세기에 따른 유동특성의 특징적인 변화는  $w_i$ 가 커짐에 따라 내부순회유동의 강도가 약해지는 현상과 내부영역에서의 Taylor-Proudman 현상이 더욱 선명해지는 현상이다. 회전판으로부터의 유입유동강도  $w_i$ 가 커짐에 따라 에크만 경계층을 따라 흐르는 유동의 상당량이 외부로부터의 유입유동에 의해 충당되고, 내부 비점성영역으로부터 회전판으로 끌려내려 오는 에크만 펌핑량이 작아져 내부의 순회유동이 약화되는 것을 볼 수 있다. 이와 함께  $w_i$ 가 커짐에 따라 용기의 측벽을 통한 유출유동 강도가 커지는 영향으로 에크만경계층을 통과한 유체가 코너영역에서 내부로 리바운드되는 코너제트 현상이 상당히 완화되는 경향을 볼 수 있다. 결과적으로 Fig. 2는  $w_i$ 가 커짐에 따라 내부의 비점성영역에서의 유동특성이 선형유동특성(회전방향속도가 Taylor-Proudman 기등을 형성하고 순회유동에서 코너제트 영향이 감소하는 현상)에 접근해가는 현상을 보여준다.

Fig. 3-5는 각각  $z=0.5$ 에서 반경방향을 따른 회전속도분포( $v$ -분포), 수직방향속도분포( $w$ -분포) 및 반경방향속도분포( $u$ -분포)를 보여주고 있다. 유체의 유출입이 없는 경우, 측벽의 속도가 회전판의 속도와 거의 같은  $\epsilon \ll 1$ 인 경우에 대한 해는 Greenspan<sup>(10)</sup>(1968)의

선형이론에 의하면 내부비점성영역의 유동은 회전속도분포는 아래판과 같은 일정한 각속도를 갖고, 반경 및 수직방향 속도는 0인 강제회전유동이다.

Fig. 3으로부터 비선형 문제( $\epsilon = 1.0$ )에 대한 내부비점성영역의 유동을 살펴보자. 측벽에서 먼 비점성영역에서의 회전방향 속도구조는,  $w_i$ 가 작은 경우(Fig. 3(a)) 원판으로부터 유입이 있는 영역( $0 \leq r \leq 0.25$ )과 나머지영역( $0.25 \leq r \leq 0.8$ )에서 서로 다른 각속도로 회전하는데 반해  $w_i$ 가 큰 경우(Fig. 3(c))는 두 영역 모두( $0 \leq r \leq 0.8$ )에서 같은 각속도로 회전하는 것을 볼 수 있다( $v$ -속도속도 프로파일의 기울기가 같으면 동일한 각속도를 갖는다).  $w_i$ 가 작은  $w_i=0$ 인 경우, 즉, 아래, 위 디스크가 회전하고 측벽이 정지한 비선형문제의 경우 앞서 언급한 코너영역에서 발생한 코너제트의 영향이 내부 비점성영역에서의 강한 순환유동에 영향을 주어 Fig. 4(a)에서처럼 내부 비점성영역에서 회전판으로 끌려가는 에크만 펌핑유동강도, 즉,  $w$ -속도분포를 받

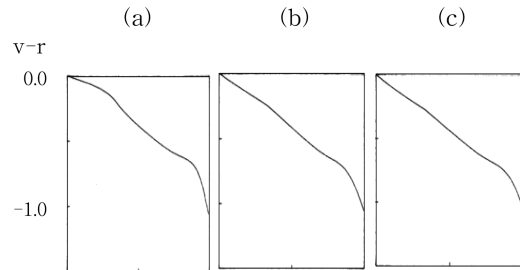


Fig. 3. Steady state azimuthal velocity,  $v$  at  $z=0.5$  ( $E=10^{-3}$ ). Injection velocity,  $w_i$ , are : (a) 0; (b) 0.05; (c) 0.1.

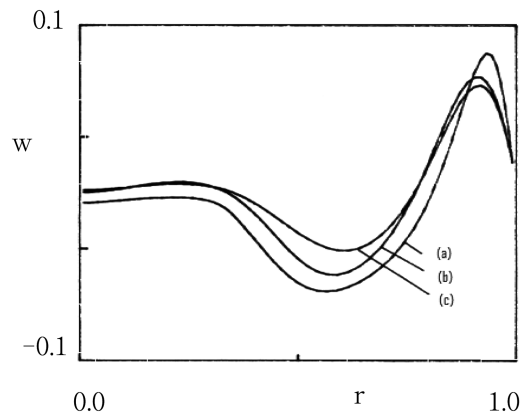
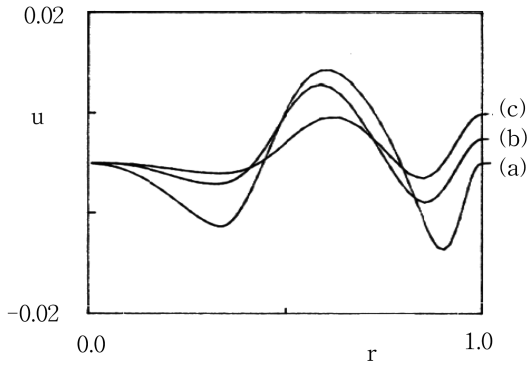


Fig. 4. Steady state radial velocity,  $w$  at  $z=0.5$  ( $E=10^{-3}$ ). Injection velocity,  $w_i$ , are : (a) 0; (b) 0.05; (c) 0.1.



**Fig. 5.** Steady state vertical velocity,  $w$  at  $z=0.5$  ( $E=10^{-3}$ ). Injection velocity,  $w_i$ , are : (a) 0; (b) 0.05; (c) 0.1.

경에 따라 다르게 변화시킨다. 동시에 질량보존을 만족시키기 위해 반경방향속도, 즉,  $u$ -속도도 Fig. 5(a)처럼 반경방향으로의 변화되는 모습을 보인다.  $u$ -속도가 영역( $0 \leq r \leq 0.25$ )에서는 음의 값을, 영역( $0.25 \leq r \leq 0.8$ )에서는 양의 값을 갖는 것을 볼 수 있다.  $z$ -축방향의 와류(vortex) 성분을 갖는 유동이 회전축을 향해 반경안쪽으로 움직이면 와늘이기(vortex stretching)가 일어나고, 반경바깥쪽으로 움직이면 와줄이기(vortex contraction)가 일어난다. 두 영역( $0 \leq r \leq 0.25$ )와 ( $0 \leq r \leq 0.8$ )에서의 회전속도의 차이는 앞서 설명한 반경방향 속도분포와 연관된 회전속도의 증감 현상으로 설명할 수 있다.

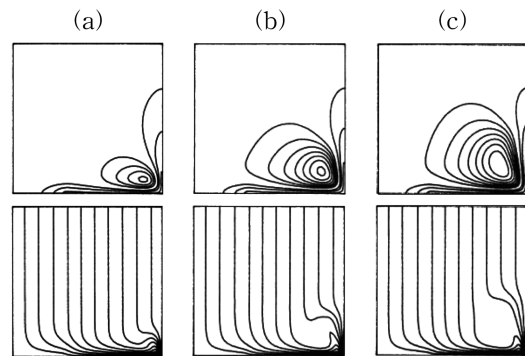
중앙에서 유입수류가 있으면 Fig. 4 & 5(b)와 Fig. 4 & 5(c)에서 볼 수 있듯이  $w_i$ 의 강도가 커짐에 따라 내부 비점성영역에서의  $u$ -속도와  $w$ -속도가 약해지는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 앞서 언급한 Fig. 2(상)의 유선에 대한 특성 변화와 일치하는 현상이다. 특히 유입수류의 강도가 매우 강한 경우,  $w_i=0.1$ 인 경우를 살펴보면 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 측벽( $r=1.0$ ) 부근의 Stewartson 경계층을 제외한 전 영역에서 유체가 거의 동일한 각속도의 회전속도를 갖는 운동을 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 유입유동강도  $w_i$ 가 충분히 큰 경우에는 내부유동이 선형유동에 가까워진다는 앞서의 설명을 다시 확인시켜주는 결과이다. 결과적으로 유입수류의 강도가 큰 경우 내부유동을 선형이론해로 근사할 수 있는 가능성을 제시해주는 결과이다.

본 연구의 결과로부터 한 가지 언급할 사실은  $O(E^{1/2})$ 크기의 유체 유출입이 있는 경우의 회전유동에

서 발생하는 유동패턴은 분출된 수류가 경계층을 따라 Ekman layer에서 Stewartson layer로 이송된다. 이것은 유체가 회전할 때 용기 측벽을 통한 소스(source)와 싱크(sink)를 동반하는 경우, 그 유량의 강도가  $O(E^{1/2})$ 인 경우 질량의 이송이 경계층을 통해 이루어진다는 Bennetts & Jackson<sup>(14)</sup>(1974)의 결과와 일치하는 결과이다.

### 3.2 과도유동

Fig. 6은 유입유동이 강도가  $w_i=0.05$ 인 경우에 대한 초기 비정상상과정에 대한 유선과 회전방향속도성분의 시간에 따른 변화모습을 보여준다. 회전유동이론에서 알려진 내부비점성영역 유동의 각운동량획득 프로세스에 대한 시간척도인 스핀-오프 시간척도  $\tau \sim O(E^{1/2})$  관점에서 살펴보면 Fig. 6(a)-(c)의 시간은 각각  $t=0.79\tau$ ,  $t=1.58\tau$ ,  $t=2.37\tau$ 에 해당된다. 회전판의 중심축 부근에 유입분출수류가 있는 경우 분출수류 부근에서 회전방향의 속도프로파일이 위로 밀리는 현상을 볼 수 있다. 이것은 분출수류에 의한 수직방향 대류가 분출수류의 각운동량을 직접 이 영역으로 전달했기 때문에 발생한 현상이다. 따라서 과도상태에서 분출수류영역( $0 \leq r \leq 0.25$ )의 회전판은 내부비점성영역의 유체를 회전판으로 끌고 오는 에크만펌핑 유동을 전혀 일으키지 못한다. 결과적으로 회전 디스크판에서 유체로 전달되는 각운동량은 유입유동을 용기의 측벽으로 이동시키는 형태로 대부분의 에너지를 소모한다. 따라서 스핀-오프 시간척도 크기의 과도시간 동안에 내부영역에서 발생하는 순환유동은 전체 영역으로 활성화 되지



**Fig. 6.** Transient streamlines(top) and contours of azimuthal velocities(bottom) ( $E=10^{-3}$ ,  $w_i=0.05$ ). Times, , are; (a) 25, (b) 50, (c) 75.

못하고 코너에 가까운 일부영역에 국한된다. 결과적으로 이 시간 동안 회전속도 프로파일을 살펴보면 수직 방향으로 등간격의 평행선 형태를 보이는 것을 Fig. 6 으로부터 확인할 수 있다. 이것은 내부의 대부분영역에서의 유동이 정상상태로 천이하는 형태로 활성화되지 않고 아직 초기상태의 모습에 머물러 있다는 것을 의미한다. 이것은 회전판과 측벽을 통한 유체의 유출입이 회전판으로부터 내부의 순환유동으로 직접적인 운동량 전달은 막는 방어벽 역할을 했기 때문에 발생하는 현상이다. 따라서 유체의 측방향 유입과 반경방향 유출이 있는 경우 내부 비점성영역의 유동이 정상상태로 가는 시간적도는 일반적으로 알려진 시간적도인 스핀-업 시간적도보다 훨씬 긴 시간을 요구한다는 것을 알 수 있다. 이 특성은 정지기동과 시동기동을 수반하는 터보기계의 열전달 문제를 고려할 때 매우 중요한 문제로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 실린더형 용기의 아래, 위 디스크가 회전하고 측벽이 정지하고 있는 상태에서 아래, 위 디스크의 측 부근영역을 통해 유체가 유입되고 측벽을 통해 유출되는 경우에 발생하는 유동특성을 유입, 유출 유동강도를 변화시키면서 조사했다. 시스템 에크만 수 ( $E$ )는  $E=10^{-3}$ 으로 경계층유동을 발생시키는 유동과라미터 영역에 대해 유입유동의 강도( $w_i$ )  $w_i \sim O(E^{1/2})$  정도의 크기에 대해 유입유동 강도 변화에 따른 유동특성을 조사했다. 수치해석을 통해 다음의 결론을 얻었다.

(1) 유입유동강도  $w_i$ 의 크기가 커지면 내부 비점성영역의 순환유동 강도가 약화되어 내부 비점성영역 유동은 정상상태에서 선형유동 해에 접근한다. 따라서 비선형 문제인 경우에도 유입유동강도가 충분히 크면 선형 이론해를 이용하여 내부유동을 해석하는 것이 가능하다.

(2) 유입유동강도  $w_i$ 의 크기가 작은 경우 에크만 경계층을 따라 반경방향으로 이동한 유체는 코너영역에서 정체압에 의한 리바운드 효과로 코너제트 현상을 발생시켜 정상상태에서 코너영역에서 방향을 바꾼 유동이 측벽을 따라 수직으로 평행하게 이동하지 않고 코너에서 직접 반경안쪽으로 기울어진 방향을 따라 움직이게 하여 경사진 주축을 갖는 내부의 순환유동을 발생시킨다.

(3) 초기상태에서 정상상태로 접근하는 과도기간 동안 회전판과 측벽을 통한 유체의 유출입 유동이 회전판으로부터 전달된 각운동량을 내부 비점성 영역의 유체에 전달하는 것을 막는 방어벽 역할을 하여 내부 비점성영역 유동이 정상상태에 접근하는 시간을 매우 느리게 만든다.

#### 참고문헌

- Owen, J.M. and Rogers, R.H., 1989, Flow and Heat Transfer in Rotating-Disc System, Research Studies Press LTD.
- Benton, E.R. and Clark, J., 1974, "Spin-up", Ann. Rev. Fluid Mech., 6, pp. 257~280.
- Zandenbergen, P.J. and Dijkstra, D., 1987, "Von Karman swirling flows", Ann. Rev. Fluid Mech., 19, pp. 465~491.
- Saffman, P.G., 1992, Vortex dynamics, Cambridge Univ. Press.
- Duck, P.W. and Foster, M.R., 2001, "Spin-up of homogeneous and stratified fluids", Ann. Rev. Fluid Mech., 33, pp. 231~263.
- Hide, R., 1968, "On Source-Sink Flows in a Rotating Fluid", J. Fluid Mech., 32, pp. 737~764
- Lundgren, T.S., 1985, "The Vortical Flow above the Drain-hole in a Rotating Vessel", J. Fluid Mech., 155, pp. 381~412.
- Suh, Y.K. and Yeo, C.H., 2004, "Theoretical and Numerical Analysis of Sink Flows under a Background Rotation", J. KSV, 2(2), pp. 38~44.
- Patankar, S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere.
- Greenspan, H.P., 1968, The Theory of Rotating Fluids, Cambridge Univ. Press.
- Stewartson, K., 1957, "On almost rigid rotations", J. Fluid Mech., 3, pp. 17~26.
- Veronis, G., 1970, "The Analogy between Rotating and Stratified Fluids", Ann. Rev. Fluid Mech., 2, pp. 37~66.
- Patterson, J.C. and Imberger, J., 1980, "Unsteady Natural Convection in a Rectangular Cavity", J. Fluid Mech., 100, pp. 65~86.
- Bennetts, D.A. and Jackson, D.N., 1974, "Source-sink flows in a rotating annulus: a combined laboratory and numerical study", J. Fluid Mech., pp. 307~323.