

원통 용기 바닥의 장애물이 스피업 유동에 미치는 영향

최윤환* · 문종춘** · 서용권***

Effect of an Obstacle on the Bottom Surface of a Circular Cylinder on the Spin-up Flow

Yoon-Hwan Choi, Jong-Choon Moon and Yong-Kweon Suh

Key Words: spin-up(스핀업), circular container(원통용기), spin-up time(스핀업 시간), PIV(입자영상유속계), mass transfer(물질전달)

Abstract

In this paper, the spin-up from rest to a state of solid-body rotation in a circular container with a slender rectangular obstacle on the bottom wall is analysed experimentally. We use a PIV method for the evolution of the free-surface flow. Laboratory experiments have been carried out for a variety of the obstacle height h (0, 5, 10 [mm]) and the liquid depth H (25, 50, 75, 100 [mm]). It was found that the spin-up time is crucially dependent on the obstacle height T . In the case of $T=10$ [mm] the spin-up time is considerably shorter than the other cases.

1. 서 론

스핀업 유동과 관련된 가장 대표적인 무차원 수는 점성력과 관성력의 비를 의미하는 에크만 수(Ekman number; $E = 4\nu/\Omega_0 H^2$)이다. 여기서, Ω_0 는 변동 각속도를 의미하며, ν 는 유체의 동점성계수를 나타내고, H 는 수심이다.

일반적으로 자연계에서 발생하는 회전유동이나 공학적 응용에서는 에크만 수가 극히 작은 값을 가진다. 이것은 점성의 효과가 고체 벽면의 얇은 층에 한정적으로 작용한다는 것을 의미하며, 이 얇은 층을 회전유동에서는 에크만 경계층이라 칭

한다. 에크만 경계층의 존재로 인하여 축방향으로의 물질전달이 가능해지며, 축방향의 속도가 존재하게 된다.

Taylor-Proudman 이론⁽¹⁾에 따르면 이 속도는 수심에 반비례하는 값을 가진다. 이와 관련해 최⁽²⁾ 등은 에크만 분출속도에 대하여 다양한 모델을 제시하여 에크만 경계층의 특성을 파악하였다.

Wedemeyer⁽³⁾는 원통용기 내의 스피업 유동에 대하여 이론해석을 수행한 결과, 수직벽면의 경계층에 의해 2차 유동(secondary flow)이 형성됨을 보였다. 또한 Cederlof⁽⁴⁾는 원통용기 내의 스피업 유동에 있어 상·하면이 유동에 미치는 영향을 실험과 해석적인 방법을 이용하여 조사한 바 있다. 그리고 Amberg와 Ungarish⁽⁵⁾는 밀도가 서로 다른 입자를 원통용기 내에 주입하여 스피업이 입자의 혼합에 미치는 영향을 조사하였다. 이들은 원통의 바닥면과 윗면의 경계층이 혼합에 지대한 영향을 미친다는 것을 파악하였다. 또한 압

* 동아대학교 생산기술연구소
e-mail; yhchoi3@lycos.co.kr, Tel. 051-200-6845
** 경동정보대학 기계산업시스템계열
*** 동아대학교 기계산업시스템공학부

측성 유체에 관하여 Hyun과 Park⁽⁶⁾은 3차원적인 유동특성을 조사하였다.

이상과 같은 선행연구의 결과에서 벽면에 장애물이 존재하면 측방향 속도가 변동하고 전체적인 유동에 지대한 영향을 미친다는 것을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 원통용기 바닥에 폭이 일정한 직육면체의 막대모양 물체를 부착시켜 높이와 수심을 변화시키면서 이에 따른 유동특성과 spin-up time이 어떠한 영향을 받는가를 파악하고자 한다.

2. 유동모델 및 실험방법

2.1 유동모델

Fig. 1은 본 실험에 사용된 원통용기를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 용기의 크기는 반경 $r = 50$ [mm]이고, 용기 바닥의 장애물은 길이×폭이 90×10 [mm]이고 높이는 각각 $h = 0, 5, 10$ [mm]인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 원통용기의 중심이 turntable의 중심에 위치하여 회전하며 이때 벽면과 바닥면에 의하여 발생하는 2차유동으로 인한 자유표면에서의 유동 특성을 파악하였다.

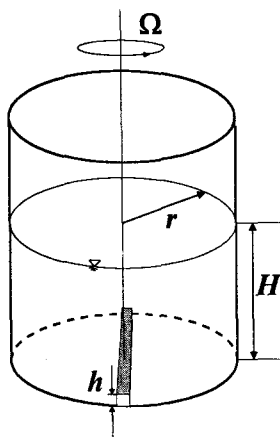
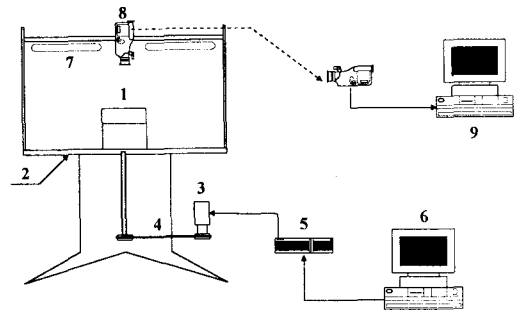


Fig. 1 Schematic diagram of model basin and coordinate system

2.2 실험방법

본 연구에서는 속도 가변형의 회전 테이블을 사용하여 가시화 실험을 수행하였다. Fig. 2는 실험장치를 도시한 것이다. 그림에서 왼쪽 부분이

유동가시화를 위한 회전테이블 장치이다.



- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1. Rectangular Container | 2. Turntable |
| 3. Servo Motor | 4. Timing Belt |
| 5. Servo Motor Controller | 6. Motor Control PC |
| 7. Fluorescent Light | 8. 6mm Digital Cam. |
| 9. Host Computer & Image Grabber | |

Fig. 2 Schematic arrangement of the turntable & the PIV system

회전테이블은 서보모터와 서보모터 드라이브에 의하여 가변적으로 회전할 수 있으며, 서보모터 드라이브의 제어는 C-프로그램으로 코딩한 프로그램에 의하여 제어된다. 여기서 원활한 테이블의 회전을 위하여 1/80의 감속비를 가지는 감속기가 사용되었고, 정확한 위치제어를 위하여 타이밍벨트가 회전축과 모터 연결용으로 사용되었다.

유동가시화실험 및 PIV 해석에 대하여 설명하면, 반경×세로가 0.1×0.15 [m]의 크기를 가지는 아크릴로 제작된 원통 용기의 중심이 회전테이블의 중심에 위치하도록 한다. 이 때 정지상태인 테이블을 일정한 속도로 회전시켜 용기 내에 형성되는 유동을 가시화하였다. Fig. 3은 테이블의 회전속도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 T_1 은 테이블이 정지상태에서 일정각속도에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 유동가시화에서는 표면에 띄워진 입자의 이동을 6mm digital 캠코더를 사용하여 촬영하였다. 촬영한 영상은 이미지 보드 (DT-3155)를 통해 디지털화하였으며, 초당 30개 정도의 프레임을 저장한 뒤 속도장 계산에 사용하였다. 속도장 계산에는 PIV 해석을 위한 상용 코드인 CACTUS 2000이 사용되었다. Table 1은

실험 조건을 요약한 것이다.

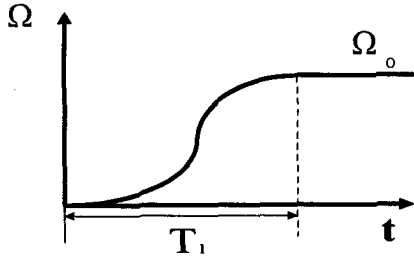


Fig. 3 Schematic diagram of the turntable's rotational speed control

Table 1 Experimental conditions

Item	Specification
Image board	DT3155 (640×480 pixel)
Light source	fluorescent light
Working fluid	Water(23-25 °C)
Particle	Acryl powder
Input device	6mm, digital cam.
Host computer	Pentium II 400MHz
Image recording	6mm, digital cam.
Identification	Cross correlation algorithm
Rotating speed (Ω_0)	15 rpm
Obstacle height (h)	0, 5, 10 [mm]
Liquid depth (H)	25, 50, 75, 100 [mm]

3. 실험결과 및 고찰

3.1 바닥의 장애물이 스핀업 유동에 미치는 효과

원통용기 바닥에 장애물이 없는 경우와 장애물이 존재하는 경우 자유표면 유동에 대한 공간 평균 운동에너지를 Fig. 4에 나타내었다. 공간 평균 운동에너지를 구하는 식은 다음과 같다.

$$K.E. = \frac{1}{A} \int (u^2 + v^2) dA \quad (1)$$

여기서 A 는 유동장의 면적을 의미한다.

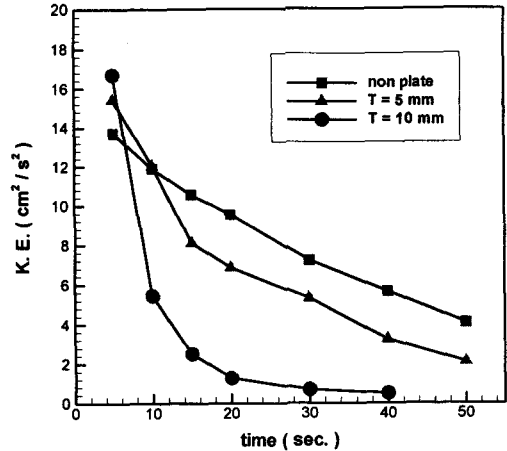


Fig. 4 Spatially averaged kinetic energy for various the plate thickness obtained by the PIV method, liquid depth 100 [mm]

그림에서 스핀업 유동 초기인 5 [sec]일 때의 에너지는 평판두께 10 [mm]에서 가장 크고 다음으로 5 [mm], 그리고 평판이 없는 순서로 나타난다. 그러나 시간이 경과하면 다른 두 경우와는 다르게 평판 높이 10 [mm]인 경우에서 에너지가 급격하게 감소하여 40 [sec]에서 에너지가 거의 소멸하는 현상을 보이고, 평판 높이가 낮아질수록 에너지는 완만하게 감소한다. 이러한 현상은 용기 바닥에서 상부면으로 공급되는 에너지의 양에 기인한다고 볼 수 있다.

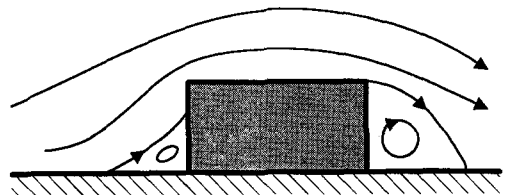


Fig. 5 Sketch of separated flow around the bottom obstacle in the circumferential section

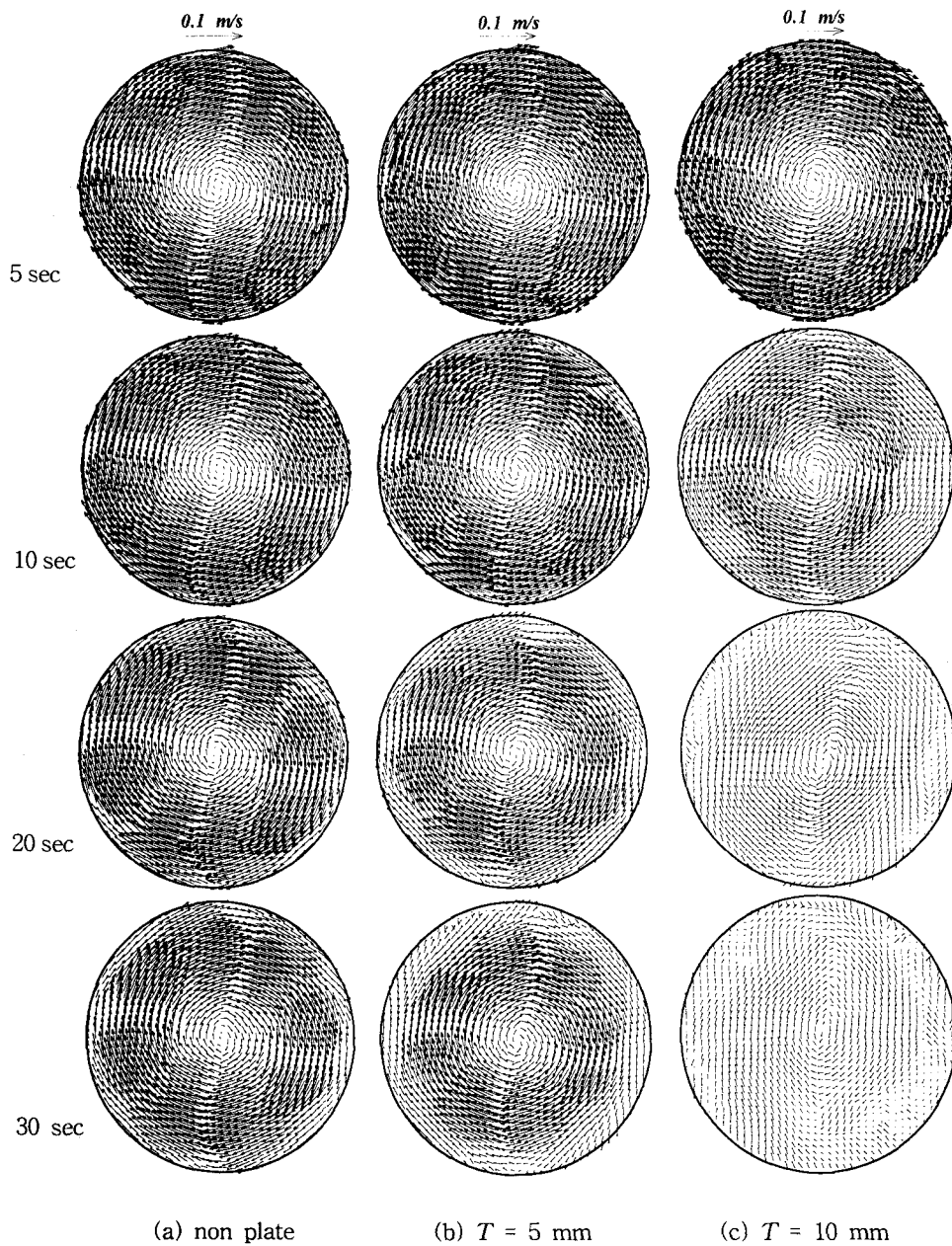


Fig. 6 PIV results of velocity vectors at the times indicated for $h=100$ [mm] for three cases of the obstacle height

즉 평판이 없는 경우는 바닥에 존재하는 얇은 에크만 경계층에 의해 상부와의 물질 전달을 가능하게 한다. 하지만 바닥에 장애물이 존재하면 장애물 전후방에 박리유동이 생기고(Fig. 5 참조) 박리 유선 내부의 유체는 장애물과 같이 회전하므로 원심력을 받는다. 이에 따라 유체는 반경방향으로(측면벽쪽으로) 이동하고 상부의 유체는 그 빈 자리를 채우기 위해 하강한다(에크만 흡입). 바닥에 장애물이 없는 경우에는 에크만 경계층 내의 유체만이 원심력을 받으므로 높은 레이놀즈 수에서는 그 효과가 미약하지만 이와 같이 장애물이 있는 경우는 레이놀즈 수와 무관하게 물질 전달을 유발시킬 수 있다. 그리고 평판이 두꺼워지면 물질전달이 더욱 활발해지므로 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있는 것이다.

Fig. 6은 세 가지 경우에 대하여 각 시간에 대한 순간 속도장을 나타낸 것이다. 그림에서 5 [sec]일 때의 유동장의 형태는 세 가지 경우 모두 유사하게 나타나고 시간이 경과하면 유동장의 세기가 감소하는 것은 공통적이다. 그러나 평판 높이가 클수록 유동은 조속히 약해지며, 이는 Fig. 4에서 설명한 바와 같은 현상으로 이해할 수 있다.

특히 주목할 만한 사항은 평판 높이가 커지면 유동장의 구조가 대칭에서 비대칭적으로 바뀌는 것이다. 시간이 30 [sec]일 때 이러한 현상은 확연하게 드러나며 이것은 하부에서 유입되는 유동으로 인하여 3차원 유동이 활발해지고 유동장의 대칭 구조가 깨어지는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 수심의 변화에 따른 스핀업 유동특성

Fig. 7은 장애물이 없을 때 수심 변화에 따른 공간평균 운동에너지를 나타낸 것이다.

수심이 깊어지면 에너지가 증가하는 현상을 보이는데 이것으로 바닥면의 에크만 경계층에 의해 생성되는 수직방향의 속도가 수심에 반비례하는 크기로 작용한다는 것으로 유추할 수 있으며, 에크만 경계층에 의한 물질 전달은 수심이 깊어지면 미약해져 상부면에 큰 영향을 미치지 않는 다.

한편 수심 75 [mm]와 100 [mm]의 차이는 25 [mm], 50 [mm]와의 차이에 비해 그다지 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이것으로 유추해

볼 때 수심 75 [mm] 부근이 바닥에서 생성된 수직방향 속도가 자유표면에 영향을 줄 수 있는 임계수심이라고 추정할 수 있다.

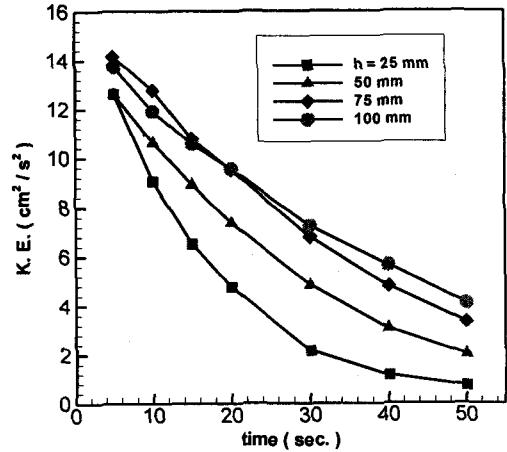


Fig. 7 Spatially averaged kinetic energy for various the liquid depth obtained by the PIV method, non plate

4. 결론

바닥에 장애물이 존재하는 원통 용기 내의 스핀업 유동에 대하여 PIV를 이용한 자유표면 유동 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평판이 높이가 커지면 상·하부 사이의 물질 전달이 활발해져 평판이 없는 경우에 비해 스핀업이 촉진된다.
2. 바닥에 존재하는 평판으로 인해 자유표면 유동장은 비대칭적인 구조를 가진다.
3. 에크만 경계층에 의해 생성된 수직방향 속도 성분이 자유표면에 영향을 줄 수 있는 임계수심이 존재한다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-002-3) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Pedlosky, J., 1982, *Geophysical Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, pp. 43~45.
- (2) 최윤환, 박준관, 서용권, 2001, "Ekman 분출모델에 의한 직사각형 용기 내의 스핀업 유동 연구," 대한기계학회논문집, 제25권 제5호 pp. 680~687.
- (3) Wedemeyer, E. H., 1964, "The Unsteady Flow Within a Spinning Cylinder," *J. Fluid Mech.* Vol. 20, pp. 383~399.
- (4) Cederlof, U., 1987, "Free-surface Effects on Spin-up," *J. Fluid Mech.* Vol. 187, pp. 395~407.
- (5) Amberg, G. and Ungarish, M., 1993, "Spin-up from Rest of a Mixture : Numerical Simulation and Asymptotic Theory," *J. Fluid Mech.* Vol. 246, pp. 443~464.
- (6) Hyun, J. M. and Park, J. S., 1991, "Spin-up from Rest of a Compressible Fluid in a Rapidly Rotating Cylinder", *J. Fluid Mech.* Vol. 237, pp. 413~434.