

다양한 축방향 홈이 있는 동심원통 내부 유동에 대한 실험적 연구

이상혁* · 김형범†

Experimental study of the Concentric Cylinder Flow with Various Axial Slit Wall

Sang-Hyuk Lee and Hyoung-Bum Kim

Abstract

The effect of axial slit wall of outer cylinder on Taylor-Couette flow was experimentally investigated. The axial slits were azimuthally located along the inner wall of outer cylinder and the number of slits was 6, 9 and 18. The radius ratio and aspect ratio of the experimental models was 0.825 and 48, respectively. We used PIV method to measure the flow field and applied refractive index matching method to resolve the image distortion due to the complex model geometry. The results showed the effect of slit on the flow transition is increased as the number of slit increased. When the model has 6 slits, there were hardly the effect of axial slit wall and the flow transition happened at the same Reynolds number of plain smooth wall model case.

Key Words : Taylor-Couette flow (Taylor-Couette 유동), Axial slit (축방향 홈), PIV (입자화상 속도계), Refractive index matching method (굴절률 보상기법)

기호설명

Ω : 안쪽 원통의 회전 각속도
 Γ : 간격에 대한 원통 길이 비(= L/d)
 η : 두 동심원통의 반지름 비(= r_i/r_o)
 ν : 작동유체의 동점도 계수
 r_i : 안쪽 원통의 반지름
 r_o : 바깥쪽 원통의 반지름
 d : 원통 사이의 간격
 L : 두 동심 원통의 길이
 Re : 회전 Reynolds 수

Z^* : 원통 간격으로 무차원한 축방향 좌표
(= Z/d)

R^* : 원통 간격으로 무차원한 반경방향 좌표
(= $(r-r_i)/d$)

1. 서론

서로 다른 속도로 회전하는 동심 원통 사이에서 회전 Reynolds 수의 증가에 따른 원심 불안정성의 증가로 다양한 유동형태가 발생한다. 바깥쪽 원통은 정지해 있고 안쪽 원통이 회전할 경우, 안쪽 원통의 회전 속도가 증가할수록 초기 circular Couette 유동에서 Taylor 와동으로 유동이 천이하며, 다음으로 파형와동(wavy vortex)과 변조 파형와동(modulated wavy vortex)을 거쳐 최종적으로 turbulent Taylor 와동으로 변하는 것이 기존의 연구로부터 알려졌다. 이와 같은 동심원통 사이

†경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구소

E-mail : kimhb@gnu.ac.kr

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

의 유동은 1923년 Taylor⁽¹⁾가 이론 및 실험적인 방법으로 연구를 시작한 이후, Taylor-Couette 유동으로 불리게 되었으며, 이와 관련된 많은 연구가 이루어 졌다.

Taylor-Couette 유동에 대한 연구는 이러한 유동 천이현상에 영향을 주는 요인에 대한 연구가 주를 이루었고, 동심원통의 반지름과 길이변화와 같은 기하학적 형상의 영향에 대한 연구와 회전 가속도의 영향에 대한 연구는 이러한 연구의 대표적인 예이다.

1976년 Cole⁽²⁾이 동심원통의 길이가 줄어들수록 파형와동이 생기는 임계 회전 Reynolds 수가 증가하는 것을 발견한 이후 동심원통 길이는 Taylor-Couette 유동의 변화에 영향을 주는 중요한 요인으로 알려졌다. 이후 동심원통의 반지름 비와 길이 비에 대한 연구가 다양한 유동의 조건에서 많이 연구 되었다.⁽³⁻⁶⁾

Taylor-Couette 유동의 연구에서 회전하는 원통의 가속도와 유동의 초기 상태 또한 유동의 천이에 많은 영향을 주는 것이 밝혀졌다. Coles⁽⁷⁾은 그의 연구를 통해 동일 회전 Reynolds 수에서 초기 유동의 형태와 회전 가속도에 따라 20~25가지의 다양한 유동형태가 나타난다고 보고하였다. 최근 보고된 Lim⁽⁸⁾ 과 Xiao⁽⁹⁾의 연구에 의하면 회전 가속도에 따라 Taylor 와동이 파형와동으로 변한 이후 다시 Taylor 와동이 나타나는 영역이 존재함을 보여주었다.

이러한 Taylor-Couette 유동에 대한 기존 연구는 대부분 원통의 벽면이 매끈한 상태에서 이루어졌다. 실제 산업 현장에서 만날 수 있는 Taylor-Couette 유동의 경우, 모터나 회전식 필터와 같이 원통 내부가 매우 복잡한 형태를 갖고 있으나 원통의 벽면 형상 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. Cadot⁽¹⁰⁾과 Van den Berg⁽¹¹⁾은 안쪽 원통의 회전력 측정을 통해 원통의 표면 거칠기가 동심원통 사이의 에너지 확산에 주는 영향을 연구하였다. 하지만 이들의 연구는 turbulent Taylor-Couette 유동에 국한되어 있었고, 두 원통의 복잡한 형상 때문에 정확한 속도장 특성을 제시하지 못했다.

본 논문에서는 모터의 내부 형상을 모사한 바깥쪽 원통의 안쪽 표면에 길이 방향으로 원주를 따라 홈이 위치하고 있는 모델을 이용해, 이것이 Taylor-Couette 유동에 어떠한 영향을 주는지에 대

한 실험적 연구를 수행하였다. PIV기법과 굴절률 보상 기법을 이용해 Reynolds 수에 따른 반지름-축방향 평면의 순간 속도장을 측정하였으며 동일한 크기의 축방향 홈이 없는 모델을 따로 제작하여 축방향 홈이 있는 경우의 결과와 비교 분석하였다. 이 연구를 통해 모터에서의 냉각, 진동 및 소음 등의 감소에 관한 이해를 높일 수 있다고 생각한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 축방향 홈의 영향을 파악하기 위해 바깥쪽 원통의 내면에 축방향 홈이 없는 형태와 축방향 홈이 6, 9, 18개 있는 형태의 네 가지 실험 장치를 제작하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 동심 원통의 기하학적 형상들을 보여준다. 축방향 홈이 없는 모델의 경우, 안쪽 원통은 polypropylene 재질로 400,000 분해능(1회전당 필요 펄스 수)의 micro stepper motor에 의해 부드럽게 구동되고 최종 유동형태에 영향이 없는 충분히 작은 회전 가속도 1.91 Re/s 로 가속되었다.⁽⁹⁾ 바깥쪽 원통은 투명 아크릴 재질로 제작되어 고정되어 있으며, 동심원통의 반지름 비(η)는 0.825이다. Cole⁽²⁾에 의하면 간격에 대한 동심 원통의 길이 비(L)가 40보다 작아질수록 Taylor 와동에서 파형와동으로 천이되는 Reynolds 수가 이론적인 값 보다 커진다고 보고되었다. 이것을 참고로 동심 원통의 길이(L)는 336mm로, 간격에 대한 길이 비는 48이다.

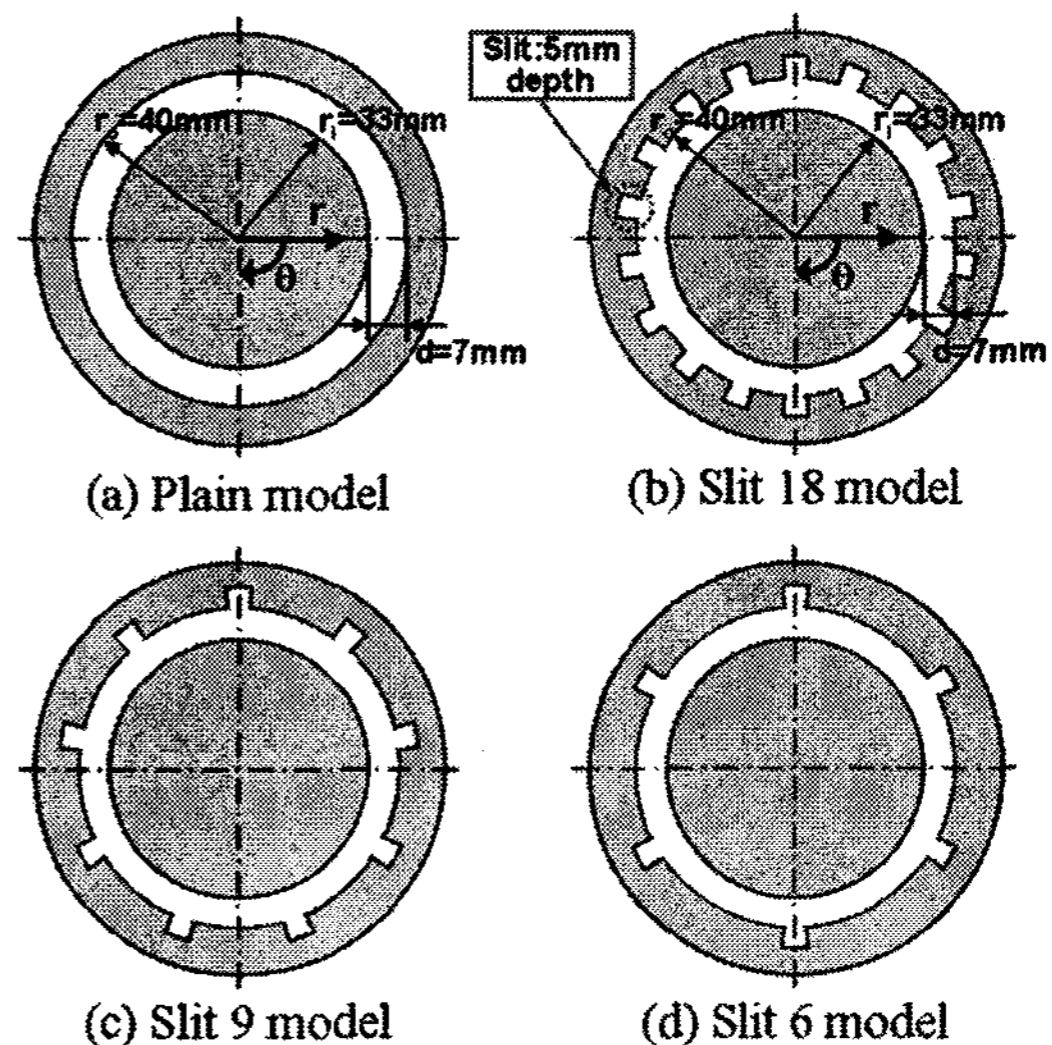


Fig. 1. Geometries of experimental models

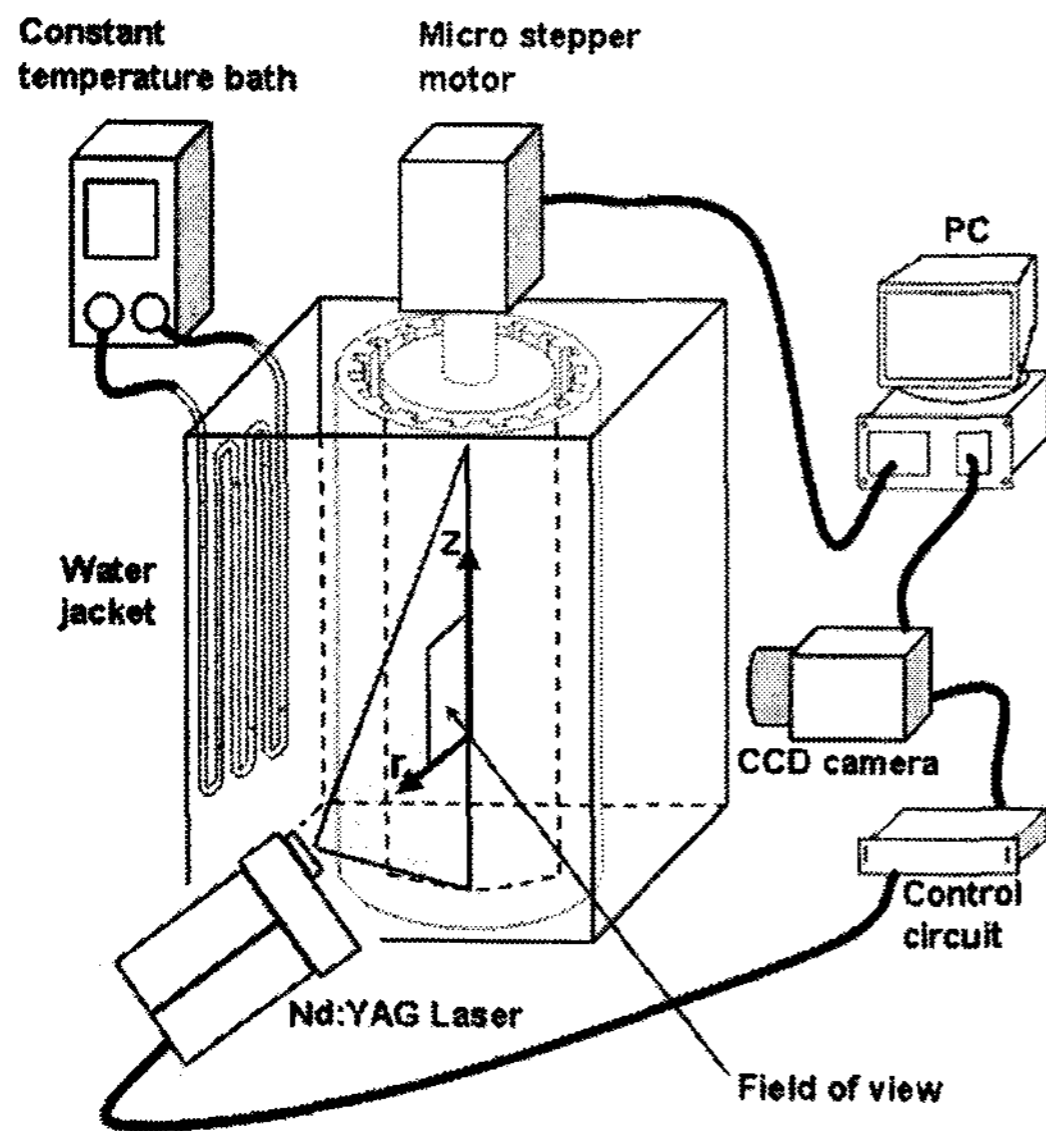


Fig. 2. Schematic diagrams of experimental apparatus to measure the velocity fields

동심 원통은 바깥쪽 원통과 동일한 재질의 사각 통에 둘러 싸여있고, 이것들은 베어링이 설치된 두 개의 아크릴 끝벽에 의해 동심을 유지하고 있다. 동심 원통 사이와 사각 통에는 동일한 작동유체로 채워져 있다.

축방향 흐름이 있는 모델의 기하학적 형상은 바깥쪽 원통이 축방향 흐름을 가지고 있는 것 이외에 축방향 흐름이 없는 모델과 동일하다. 바깥쪽 원통의 내면에는 축방향으로 원주를 따라 6, 9, 18개의 흐름이 위치하고 있으며 흐름의 폭과 깊이는 각각 5mm이다.

PIV기법을 사용하기 위해서는 왜곡이 없는 영상이 필요하다. 즉, 굴절률 차이에 의해 바깥쪽 원통의 복잡한 표면을 지나오는 빛의 왜곡을 최소화해야 한다. 이를 위해 굴절률 보상기법을 사용하였다. 이 기법은 굴절률 정합체를 사용하여 빛이 지나가는 과정의 거의 모든 매질의 굴절률을 동일하게 함으로써 굴절에 의한 영상 왜곡을 최소화 시키는 것이다.

본 실험에서는 굴절률 정합체로 아크릴과 굴절률이 비슷한 요오드화나트륨 수용액을 사용하였다. 전체 작동유체에 대한 요오드화나트륨의 무게 비는 64wt% 이다. 작동유체의 동점도(ν)는 24°C일 때 1.52cSt 이었다. 온도에 민감한 동점도 변화를 억제하기 위하여 순환식 항온수조와 열교

환기를 이용하여 일정한 온도로 유지시켰다.

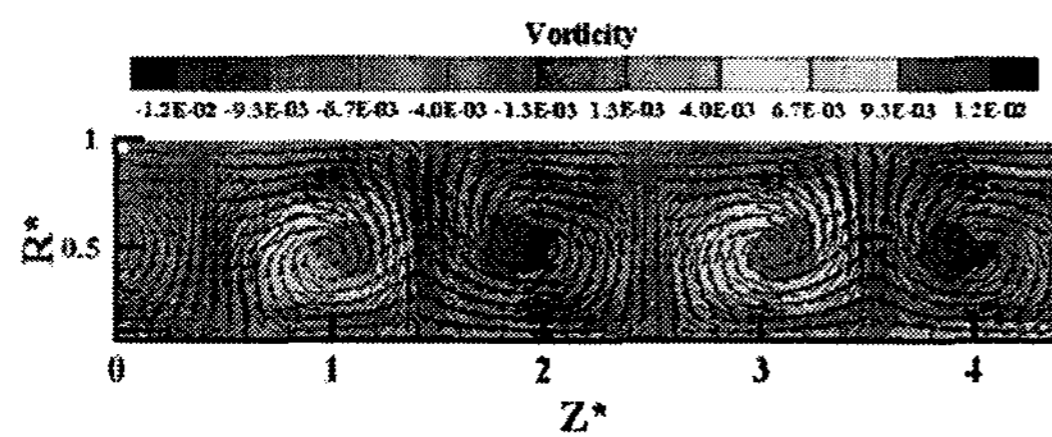
PIV측정을 위해 광원으로 2-head Nd:YAG Laser를 사용하였으며, 1600x1200pixel의 해상도를 가지는 CCD카메라를 이용해 영상을 획득 하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 보여준다.

3. 실험결과

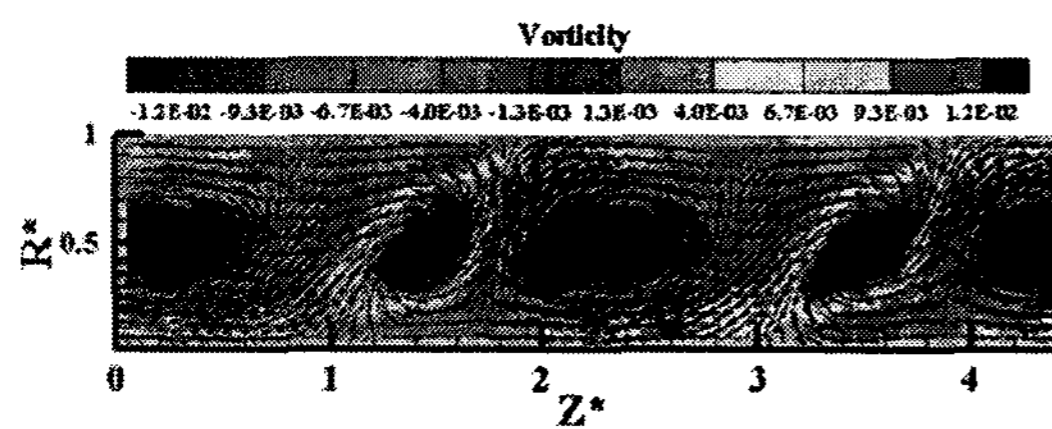
축방향 흐름이 없는 모델의 경우, Reynolds 수의 증가에 따른 동심 원통 사이의 원심 불안정성 증가로 $Re=103$ 일 때 circular Couette 유동에서 Taylor 와동으로 천이하였고, $Re=124$ 일 때 Taylor 와동에서 파형와동으로 천이하였다. Taylor 와동의 시간에 따른 축방향 이동은 없으며, 와동 하나의 축방향 크기는 1.1~1.2d 정도로 동심 원통간의 간격과 비슷한 크기를 가졌다. 주파수 분석을 통해 파형와동의 축방향 왕복 주파수가 Re 가 증가함에 따라 커짐을 확인할 수 있었고, $Re=1527$ 과 1909일 때 각각 변조파형와동과 turbulent Taylor 와동 형태를 가짐을 반지름-축방향 평면의 순간속도장과 주파수 분석을 통해 확인할 수 있었다. $Re=1527$ 일 때 변조파형와동은 두 개의 주파수(1.35, 1.81Hz)가 나타났다. Fig. 3은 축방향 흐름이 없는 모델의 경우 Taylor 와동, 파형와동, 변조파형와동 그리고 turbulent Taylor 와동의 순간속도장을 보여준다.

축방향 흐름이 있는 모델들의 경우, 축방향 흐름이 없을 때와 동일한 $Re=103, 124$ 에서 각각 Taylor 와동과 파형와동으로 천이 하였다. 하지만 축방향 흐름이 18개인 모델의 경우 $Re=143$ 이상에서 축방향 흐름이 없는 경우와 다른 결과가 나타났다. $Re=143$ 이상에서는 시간에 따른 주기적인 특성이나 안정화 된 와동 특성이 나타나지 않았다. Taylor 와동과 파형와동, 불안정한 와동 등이 동일 Re 수에서 서로 혼재하여 나타났다.

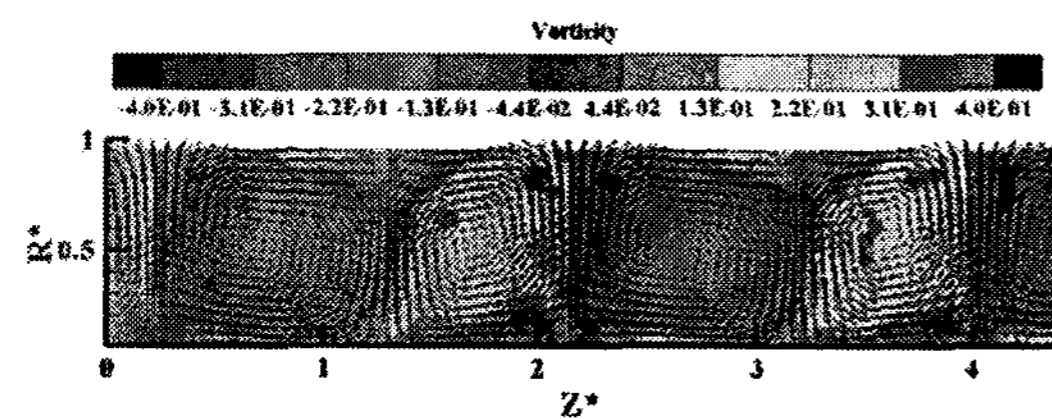
축방향 흐름이 9개 있는 모델의 경우에는 축방향 흐름이 18개인 모델에서 $Re=143$ 일 때 나타났던 불안정한 와동이 $Re=897$ 일 때부터 나타났다. 즉, 축방향 흐름의 개수가 줄어들어서 불안정한 유동이 발생하는 Re 가 증가하였음을 알 수 있다. 이로부터 축방향 흐름이 18, 9개인 모델에서 각각 $Re=143$ 과 $Re=897$ 일 때 축방향 흐름의 영향으로 turbulent 와동으로 천이 되는 것을 알 수 있다.



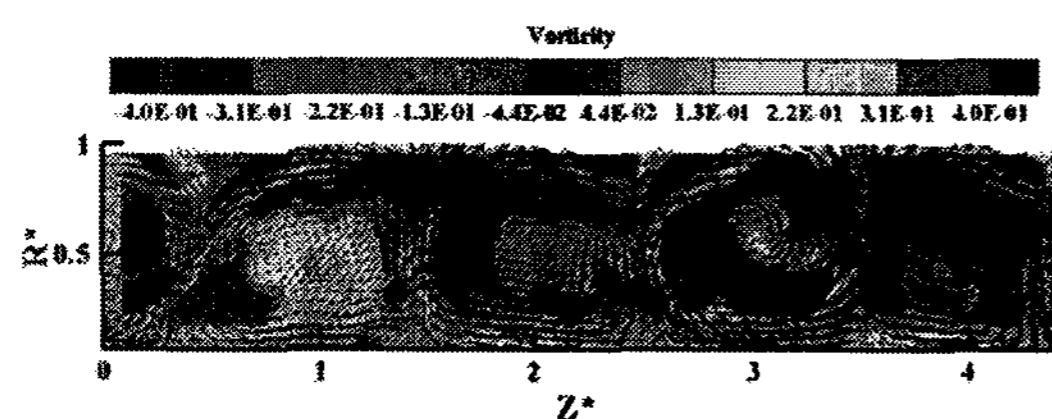
(a) Taylor vortex flow, Re=115



(b) Wavy vortex flow, Re=143



(c) Modulated wavy vortex flow, Re=1527

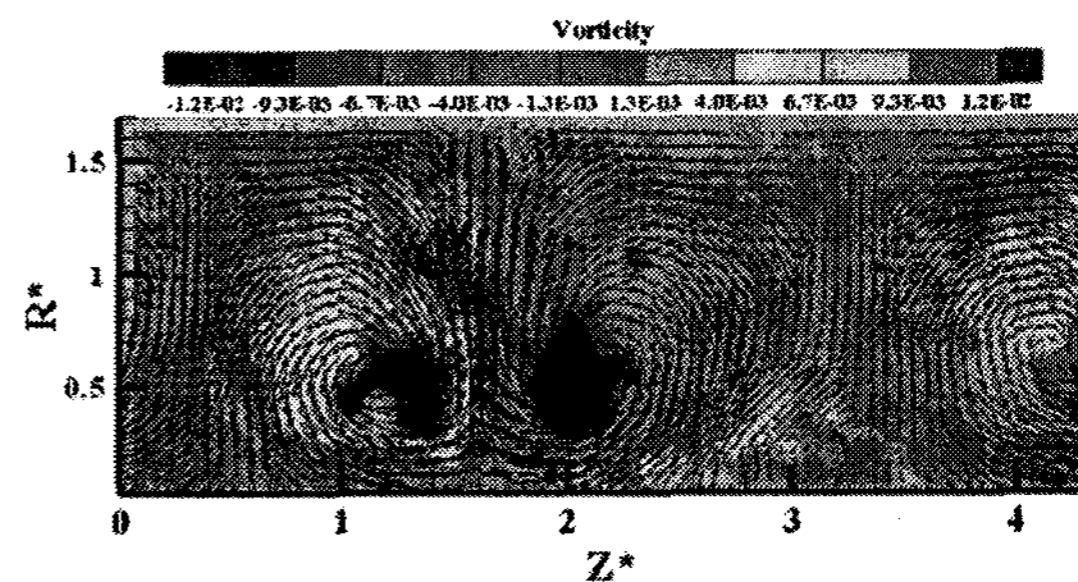


(d) Turbulent Taylor vortex flow, Re=2863

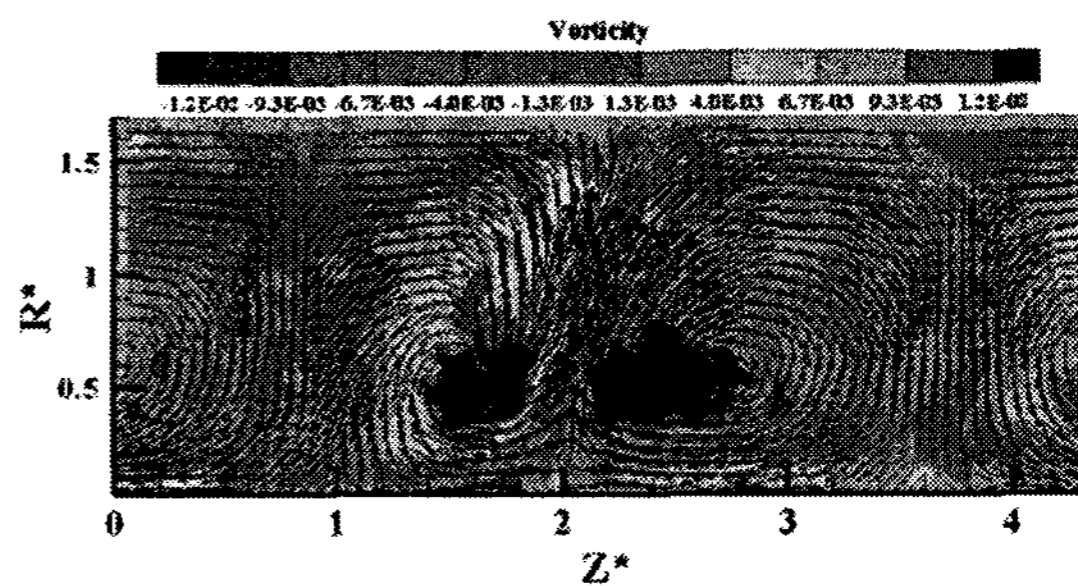
Fig. 3. Instantaneous velocity fields in plain model

Table 1 Flow types in four kinds of experimental model for various Reynolds numbers; Circular Couette flow:CCF, Taylor vortex flow:TVF, wavy vortex flow:WVF, modulated wavy vortex flow:MWVF, unstable vortex flow:UVF, turbulent Taylor vortex flow:TTVF

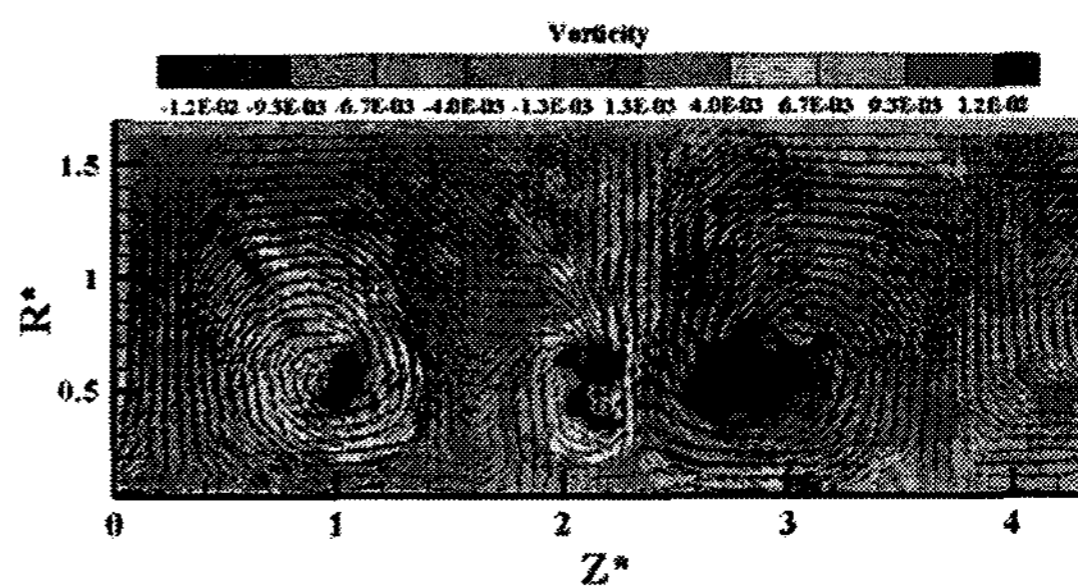
Re	Plain	Slit6	Slit9	Slit18
57	CCF	CCF	CCF	CCF
103	TVF	TVF	TVF	TVF
124	WVF	WVF	WVF	WVF
143	WVF	WVF	WVF	UVF
897	WVF	WVF	UVF	UVF or TTVF
1527	MWVF	MWVF	TTVF	TTVF
1909	TTVF	TTVF	TTVF	TTVF



(a) Taylor vortex flow



(b) Wavy vortex flow



(c) Unstable vortex flow

Fig. 4. Instantaneous velocity fields of various vortex type, Re=143, slit18 model

축방향 홈이 18개 있는 모델의 Re=143일 때 나타나는 불안정한 와동을 Fig. 4에 나타내었고, 이 불안정한 와동을 unstable 와동으로 표시하였다.

축방향 홈이 6개 있는 모델에서는 앞선 축방향 홈이 18, 9개인 모델에서 나타났던 turbulent Taylor와동으로의 조기 천이현상이 나타나지 않았다. 즉, 축방향 홈의 영향에 의한 유동 불안정성의 증가가 없음을 알 수 있다.

본 연구에 사용된 실험 장치와 Re에 따른 유동 형태를 표 1에 정리 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 바깥쪽 원통의 내면에 원주를

따라 위치한 축방향 흐름의 Taylor-Couette 유동에 대한 영향을 파악하기 위해 PIV기법을 이용한 정량적 실험을 통해 분석 하였다.

결과로부터 축방향 흐름은 파형와동이 나타나기 전까지의 초기 원심불안정성 영역에서는 그 영향이 없으나 축방향 흐름의 개수에 따라 특정 Reynolds 수 이상에서 동심원통 사이의 유동 불안정성을 증가시켜 난류로의 천이를 촉진함을 알 수 있었다. 그리고 축방향 흐름의 개수가 증가 할 수록 유동 불안정성에 대한 축방향 흐름의 영향이 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Liquid Contained between Two Rotating Cylinders," Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 223, pp. 289-343.
- 2) Cole, J. A., 1976, "Taylor-vortex Instability and Annulus-Length Effects," J. Fluid Mech., Vol. 75, pp. 1-15.
- 3) Lewis, J. W., 1928, "An Experimental Study of the Motion of a Viscous Liquid Contained between Two Coaxial Cylinders," Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 117, pp. 388-407
- 4) Snyder, H. A., 1968, "Stability of Rotating Couette Flow. I. Asymmetric Waveforms," Phys. Fluids, Vol. 11, pp. 728-734.
- 5) King, G. P., Li, Y., Lee, W. and Swinney, H. L., 1984, "Wave Speeds in Wavy Taylor-vortex Flow," J. Fluid Mech., Vol. 141, pp. 365-390.
- 6) Edward, W. S., Beane, S. R. and Varma, S., 1991, "Onset of Wavy Vortices in the Finite-length Couette-Taylor Problem," Phys. Fluids A Vol. 3, Issu. 6, pp. 1510-1518
- 7) Coles, D., 1965, "Transition in Circular Couette Flow," J. Fluid Mech. Vol. 21, pp. 385-425.
- 8) Lim, T. T., Chew, Y. T. and Xiao, Q., 1998, "A New Flow Regime in Taylor-Couette Flow," Phys. Fluids, Vol. 10, pp. 3233-3235.
- 9) Xiao, Q., Lim, T. T. and Chew, Y. T., 2002, "Second Taylor vortex Flow: Effects of Radius Ratio and Aspect Ratio," Phys. Fluids, Vol. 14, pp. 1537-1539.
- 10) Cadot, O., Couder, Y., Daerr, A., Douady, S. and Tsinober, A., 1997, "Energy Injection in Closed Turbulent Flows: Stirring Through Boundary Layers Versus Inertial Stirring," Phys. Rev. E, Vol. 56, pp. 427-433.
- 11) Van den Berg, T. H., Doering, C. R., Lohse, D. and Lathrop, D. P., 2003, "Smooth and Rough Boundaries in Turbulent Taylor-Couette Flow," Phys. Rev. E, Vol. 68, 036307.