

Taylor-Couette 유동에서 축방향 홈과 반경방향 온도구배의 영향에 대한 실험적 연구

이상혁* · 김형범†

Experimental Study of the Axial Slit Wall and Radial Temperature Gradient Effect on Taylor-Couette Flow

Sang-Hyuk Lee and Hyoung-Bum Kim

Abstract. The effect of the radial temperature gradient and the presence of slits in the wall of outer of two cylinders involved in creating a Taylor-Couette flow was investigated by measuring the velocity field inside the gap. The slits were azimuthally located along the inner wall of the outer cylinder and the number of slits used in this study was 18. The radius ratio and aspect ratio of the models were 0.825 and 48, respectively. The heating film wrapped around the inner cylinder was used for generating the constant heat flux and we ensured the constant temperature condition at the outer space of the outer cylinder. The velocity fields were measured by using the PIV (particle image velocimetry) method. The refractive index matching method was applied to remove image distortion. The results were compared with plain wall configuration of Taylor-Couette flow. From the results, the presence of slits in the wall of outer cylinder and temperature gradient increased the flow instability.

Key Words: Taylor-Couette flow (Taylor-Couette 유동), Axial slit (축방향 홈), Radial temperature gradient (반경방향 온도구배), PIV (입자화상 속도계)

1. 서 론

서로 다른 속도로 회전하는 동심원통 사이에서 Reynolds 수의 증가에 따른 원심 불안정성의 증가로 다양한 유동형태가 발생한다. 이 유동에 관하여 1923년 Taylor⁽¹⁾가 이론 및 실험적인 방법으로 연구를 시작한 이후, Taylor-Couette 유동으로 불리게 되었다.

Taylor-Couette 유동에 대한 연구는 유동의 변화에 영향을 주는 다양한 요인에 대한 연구가 주를 이루었다. 동심원통의 반지름과 길이변화와 같은 기하학적 형상의 영향에 대한 연구와 회전가속도의 영향에 대한 연구도 많이 이루어 졌다. 이러한 연구로부터 동심원통의 반지름 비에 따라 초기 유동 불안성이 나타나기 시작하는 임계 Reynolds 수가 달라진다고 보고되었으

며^(2,3), 동일 Reynolds 수 일지라도 초기 유동의 형태와 회전 가속도에 따라 20~25가지의 다양한 유동형태가 나타나는 것이 Coles⁽⁴⁾의 연구로 알려졌다. 그리고 Lim 등⁽⁵⁾과 Xiao 등⁽⁶⁾은 안쪽 원통의 회전가속도와 길이비에 따라 wavy vortex 유동 이후 second Taylor vortex 유동이 존재함을 밝혔다. 또한 최근 들어 PIV (particle image velocimetry) 기법과 같은 정량적 유동 측정기법과 컴퓨터를 활용한 해석기법의 발달로, Taylor-Couette 유동에 대한 정성적인 연구뿐만 아니라 정량적인 연구가 많이 진행되고 있다.^(7,8)

최근 공작기계 및 추진체의 고성능화를 위하여 동력원으로 회전축 안에 삽입되는 형태인 빌트인(built-in) 모터가 활발히 개발되고 있다. 이러한 빌트인 모터는 기어나 감속기와 같은 별도의 동력 전달장치가 없이 고속으로 축을 회전시킬 수 있는 능력을 요구받고 있다. 따라서 고성능 빌트인 모터를 설계하는데 있어서 냉각, 진동 및 소음 등은 매우 중요한 설계변수로 작용하고 있다. 빌트인 모터는 바깥쪽 원통의 내면에 축방

†경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구소
E-mail : kimhb@gnsu.ac.kr

*경상대학교 기계항공공학부 대학원

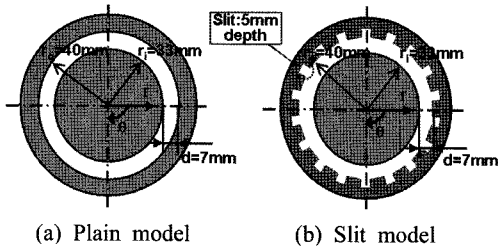


Fig. 1. Geometries of experimental models

향으로 여러 개의 홈이 위치해 있고 내부에 열이 발생하는 구조로 되어있다. 이는 발열이 있는 Taylor-Couette 유동으로 해석 할 수 있다. Cadot 등(1997)⁽⁹⁾과 Van den Berg 등(2003)⁽¹⁰⁾은 안쪽 원통의 회전력 측정을 통해 원통의 표면 거칠기가 동심원통 사이의 에너지 확산에 어떠한 영향을 주는지에 대해 연구하였으며, Lee와 Minkowycz⁽¹¹⁾는 나프탈렌 승화기법을 이용하여 축방향 홈이 있는 동심원통 사이에서의 열전달 특성을 연구하였다. 하지만 이들의 연구는 turbulent Taylor-Couette 유동 또는 축방향 유동이 있는 조건에 국한되어 있었고, 두 원통의 복잡한 형상 때문에 정확한 속도장 특성을 제시하지 못했다.

본 연구에서는 빌트인 모터의 성능향상 연구를 위해 바깥쪽 원통의 안쪽 표면에 축방향 홈을 따라 홈이 위치해 있고, 안쪽 원통이 발열을 하고 있을 때, 이것이 Taylor-Couette 유동에 어떠한 영향을 주는지에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 동심원통의 기하학적 형상을 보여준다. 축방향 홈의 영향을 연구하기 위해 동심원통 표면에 축방향 홈이 없는 형태와 바깥쪽 원통의 내면에 축방향으로 원주를 따라 18개의 홈이 위치하고 있는 형태의 두 가지 실험 장치를 제작하였다. 여기서 축방향 홈의 개수는 현재 개발 중인 빌트인 모터의 내부를 참고로 하여 결정하였다. 안쪽 원통은 polypropylene 재질로 반경이 33 mm이며 400,000 분해능(1회전당 필요 펄스 수)의 micro stepper motor에 의해 1.91 Re/s 의 회전 가속도로 부드럽게 구동된다. 안쪽 원통의 표면은 발열필름으로 감싸여져 있고 회전식 전극을 통해 회전 중에도 전원공급이 가능하도록 하였다. 바깥쪽 원통은 투명 아크릴 재질로 고정되어

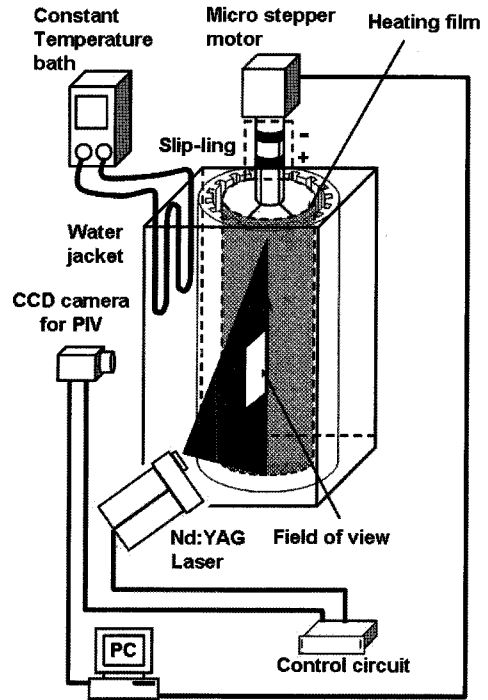


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup

있으며 안쪽 반지름은 40 mm이다. 두 동심원통 사이의 간격은 7 mm이고, 반지름 비는 0.825이다. 축방향 홈의 폭과 깊이는 각각 5 mm 이다. Cole⁽¹²⁾에 의하면 간격에 대한 원통의 길이비가 40보다 작아질수록 Taylor vortex 유동에서 wavy vortex 유동으로 천이되는 Reynolds 수가 커진다고 보고되었다. 이것을 참고로 유동 천이에 대한 영향이 없는 40보다 큰 48을 사용하였고, 두 원통의 길이는 336 mm였다. 동심 원통은 바깥쪽 원통과 동일한 재질의 사각통에 둘러 싸여있고, 이것들은 베어링이 설치된 두 개의 아크릴 끝벽에 의해 동심을 유지하고 있다. 동심 원통 사이의 사각통에는 동일한 작동유체로 채워져 있다.

본 실험에서는 작동유체로 요오드화나트륨(NaI) 수용액을 사용하였다. 이것은 아크릴과 굴절률이 비슷한 굴절률 정합체로 바깥쪽 원통의 복잡한 형상에 의한 영상의 왜곡을 최소화 한다. 전체 작동유체에 대한 요오드화 나트륨의 무게 비는 64wt% 이다. 작동유체의 동점도는 Canon-fenske 동점도계를 이용하여 측정하였으며, 24°C일 때 요오드화나트륨 수용액의 동점도 값은 1.52cSt 이다. 동심원통 주위의 온도는 순환식 항온수조와 열교환기를 이용하여 일정한 온도로 유지시

켰다. PIV기법을 이용한 속도장 측정을 위해 광원으로 Nd:YAG laser (PIV SoloIII[®])를 사용하였으며, 1600×1200 pixel 의 해상도를 가지는 CCD카메라 (PCO1600[®])를 이용해 영상을 획득하였다. Fig. 2는 전체적인 실험장치의 개략도를 보여준다.

3. 실험결과

3.1 온도구배가 없을 때 축방향 흡의 영향

본 연구에 사용된 두 가지의 실험장치 모두 Reynolds 수의 증가에 따른 동심원통 사이의 원심 불안정성 증가로 $Re=103$ 과 124일 때 각각 Taylor vortex 유동과 wavy vortex 유동으로 천이하였다. Wavy vortex 유동일 경우 vortex들이 일정한 주기를 가지며 축방향으로 왕복운동을 하였으며, Reynolds 수가 증가할수록 축방향 왕복 주파수는 증가 하였다. 이후, plain model의 경우 modulated wavy vortex 유동을 거쳐 최종적으로 $Re=1909$ 에서 turbulent Taylor vortex 유동으로 천이하였다. 하지만 Fig. 3과 4에서 보는 것과 같이 slit model의 경우 plain model과 달리 $Re=143$ 에서 불안정한 와동구조가 나타났으며, 이는 축방향 흡의 영향으로 유동 불안정성이 증가하여 조기에 난류로 천이하였음을 보여준다.

Fig. 5는 turbulent Taylor vortex 유동의 순간 속도장

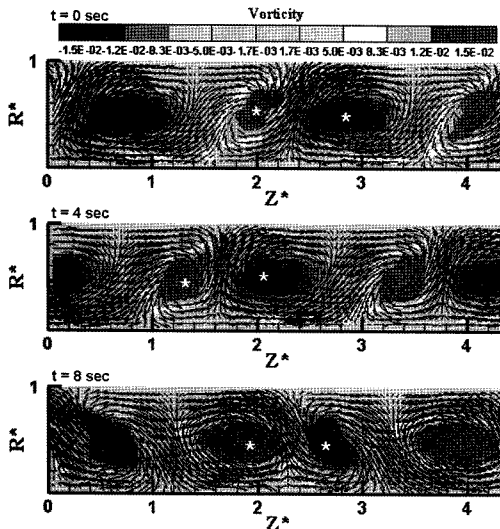


Fig. 3. Instantaneous velocity fields of wavy vortex flow in plain model with the isothermal condition ($Re=143$)

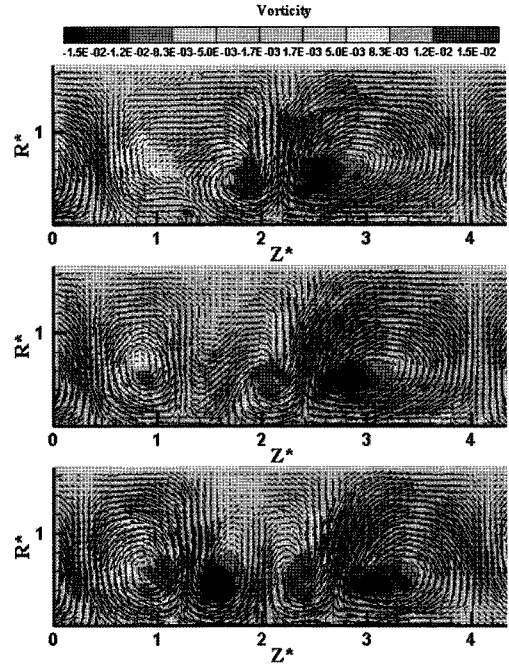


Fig. 4. Instantaneous velocity fields of weakly turbulent Taylor vortex flow in slit model with the isothermal condition ($Re=143$)

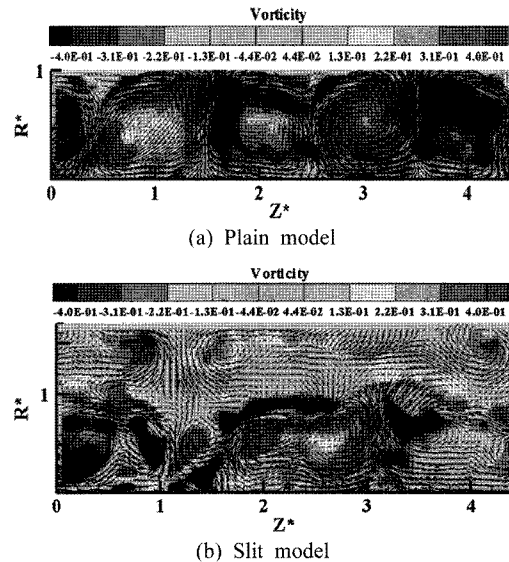


Fig. 5. Instantaneous velocity fields of turbulent Taylor vortex flow with the isothermal condition ($Re=2863$)

을 보여주고 있다. slit model의 경우 plain model에서의 turbulent Taylor vortex 유동과는 달리 크고 작은 와동들이 불규칙하게 산재되어 있고, 더 복잡한 유동 구

조를 가짐을 확인 할 수 있었다.

3.2 온도구배가 있을 때 축방향 흐름의 영향

Reynolds 수에 따른 동심원통 사이에서의 속도장 측정에 앞서 동심원통 표면에서의 온도를 열전대를 이용하여 측정하였다. Plain model의 경우 안쪽 원통과 바깥쪽 원통의 표면온도는 각각 25.4°C와 23.5°C였고, slit model의 경우 25.9°C와 24.8°C였다. 그리고 축방향 흐름의 안쪽 벽면 온도는 23.8°C였다. 따라서 안쪽 원통과 바깥쪽 원통간의 온도차에 의해 동심원통 사이에 자연대류가 발생하였다.

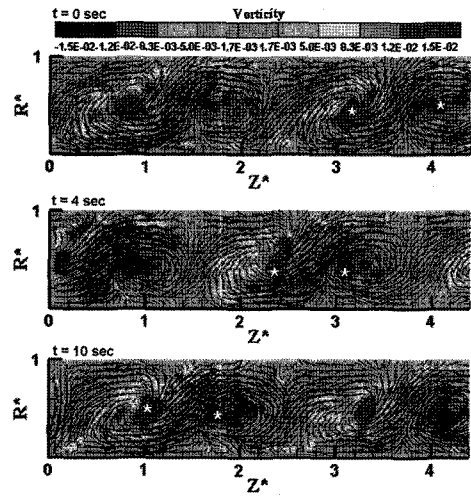
Fig. 6은 $Re=117$ 에서 helical vortex 유동을 보여주고 있다. 자연대류에 의한 축방향 유동의 영향으로 와동들이 나선형으로 내려가는 현상을 확인 할 수 있었다. 그리고 Reynolds 수가 증가함에 따라 helical wavy vortex 유동, random helical vortex 유동으로 천이하였다.

하지만 plain model의 경우 $Re=344$ 에서 다시 helical wavy vortex 유동이 나타났고 $Re=574$ 에서는 wavy vortex 유동이 나타났다. 즉, $Re=574$ 이상에서는 온도구배가 없는 조건에서의 유동과 동일한 유동구조를 보였다. 이것은 Reynolds 수가 증가 할수록 원심불안정성이 증가하게 되고 특정 Reynolds 수 이상에서는 원심불안정성에 의한 영향이 온도구배에 의한 영향보다 상대적으로 크게 작용하기 때문에 온도구배에 의한 영향이 나타나지 않음을 의미한다. Fig. 7은 $Re=344$ 일 때 helical wavy vortex 유동을 보여준다.

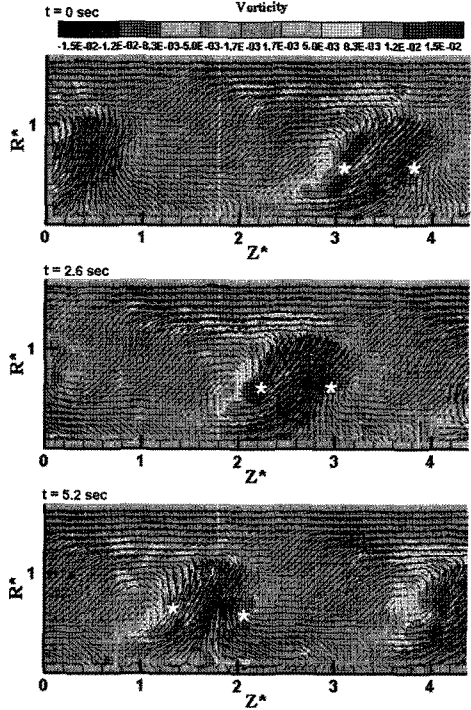
Slit model의 경우 $Re=175$ 보다 낮은 Reynolds 수 영역에서는 plain model의 경우와 비슷한 유동 구조를 보였다. 하지만 $Re=175$ 이상에서는 온도구배가 없을 때 slit model의 결과처럼 조기에 turbulent Taylor vortex 유동으로 천이하였다. 따라서 동심원통 사이의 유동에서 turbulent Taylor vortex 유동으로의 천이에 축방향 흐름이 가장 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. Slit model에서 $Re=173$ 일 때 불규칙한 와동 구조를 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 동심원통내에 온도구배가 없을 때와 있을 때 Reynolds 수에 따른 유동 구조를 Fig. 9에 정리하였다.

4. 결 론

본 실험에서는 온도구배가 있을 때와 없을 때 각각 축방향 흐름의 영향에 대해 반지름-축방향 속도장 측정



(a) Plain model



(b) Slit model

Fig. 6. Instantaneous velocity fields of helical vortex flow with the radial temperature gradient ($Re=117$)

을 통하여 연구하였다.

온도구배가 없을 때 축방향 흐름은 층류유동간의 천이에는 영향을 주지 않았다. 하지만 특정 Reynolds 수 ($Re=143$) 이상에서 축방향 흐름은 난류로의 천이를 가속

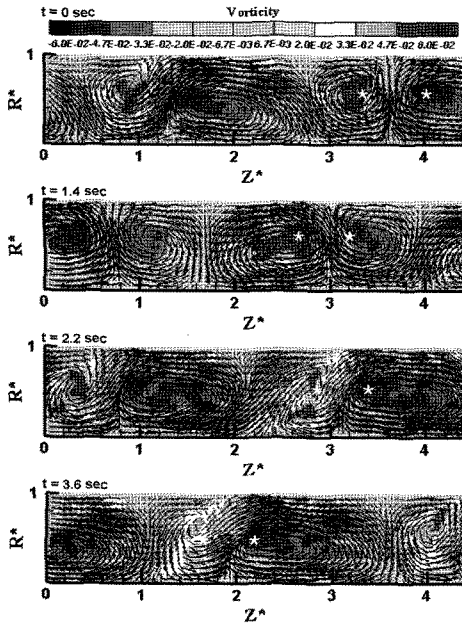


Fig. 7. Instantaneous velocity fields of helical wavy vortex flow with the radial temperature gradient (Re=344)

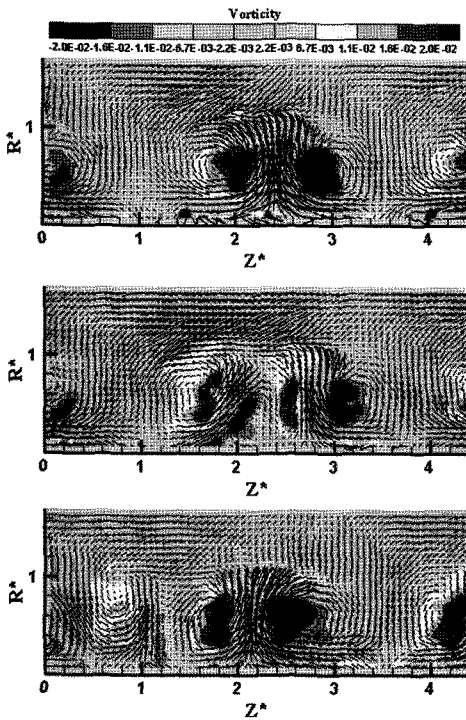
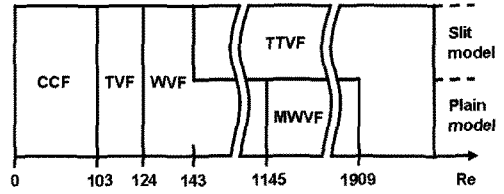
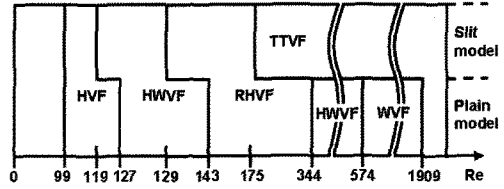


Fig. 8. Instantaneous velocity fields of weakly turbulent Taylor vortex flow in slit model with the radial temperature gradient (Re=173).



(a) With the isothermal condition



(b) With the radial temperature gradient

Fig. 9. Flow regimes for various Reynolds number; CCF: circular Couette flow; TVF: Taylor vortex flow; WVF: wavy vortex flow; MWVF: modulated wavy vortex flow; TTVF: turbulent Taylor vortex flow; HVF: helical vortex flow; HWVF: helical wavy vortex flow; RHVF: random helical vortex flow

시킴을 알 수 있었다.

온도구배가 있을 때 plain model의 경우 Reynolds 수가 574 이상에서는 원심불안성의 영향이 지배적으로 작용하여 온도구배에 의한 영향이 나타나지 않았으며, slit model의 경우 온도구배가 없는 경우와 같이 축방향 흐름이 turbulent Taylor vortex 유동으로의 천이에 지배적으로 영향을 줄을 알 수 있었다.

기호설명

- Ω : 안쪽 원통의 회전 각속도
- Γ : 간격에 대한 원통 길이의 비(=L/d)
- h : 원통의 반지름 비(=r_i/r_o)
- v : 작동유체의 동점도 계수
- r_i : 안쪽 원통의 반지름
- r_o : 바깥쪽 원통의 안쪽 반지름
- d : 원통 사이의 간격(=r_o-r_i)
- L : 원통의 길이
- Re : 회전 Reynolds 수(=r_iΩd/v)
- Z* : 원통 간격으로 무차원한 축방향 좌표(=Z/d)
- R* : 원통 간격으로 무차원한 반경방향 좌표(=(r-r_i)/d)

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 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) Snyder, H. A., 1968, "Stability of Rotating Couette Flow. I. Asymmetric Waveforms," Phys. Fluids, Vol. 11, pp. 728-734.
- 3) Langford, W. F., Tagg, R., Kostelich, E. J., Swinney, H. L. and Golubisky, M., 1988, "Primary Instabilities and Bicriticality in Flow between Counter-rotating Cylinders," Phys. Fluids, Vol. 31, pp. 776-785.
- 4) Coles, D., 1965, "Transition in Circular Couette Flow," J. Fluid Mech., Vol. 21, pp. 385-425.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Wereley, S. T. and Lueptow, R. M., 1998, "Spatio-Temporal Character of Non-wavy and Wavy Taylor-Couette Flow," J. Fluid Mech., Vol. 364, pp. 59-80.
- 8) Hwang, J. Y. and Yang, K. S., 2003, "On the Structures of Taylor Vortices," Trans. of the KSME (B), Vol. 27, No. 8, pp. 1081-1088.
- 9) Cadot, O., Couder, Y., Daerr, A., Douady, S. and Tsinober, A., 1997, "Energy Injection in Closed turbulent flow: Stirring Through Boundary Layers Versus Inertial Stirring," Phys. Rev. E, Vol. 56, pp. 427-433.
- 10) 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.
- 11) Lee, Y. N. and Minkowycz, W. J., 1989, "Heat Transfer Characteristics of the Annulus of Two-coaxial Cylinders with one Cylinder Rotating," Int. J. Heat and Mass Trans., Vol. 32, No. 4, pp. 711-722.
- 12) Cole, J. A., 1976, "Taylor-Vortex Instability and Annulus-Length Effects," J. Fluid Mech., Vol. 75, pp. 1-15.