

안쪽축이 회전하는 환형관내 유동의 수치해석적 연구

김영주¹⁾ · 우남섭¹⁾ · 황영규²⁾

1. 서론

안쪽 실린더가 회전하는 환형관내 유동에 대해 Rayleigh는 비점성 유체라는 가정아래 최초로 회전 유동의 안정성에 대한 연구를 하였으며, Taylor⁽¹⁾는 점성 유체에 대하여 선형이론을 적용하여 회전 유동의 안정성에 대한 연구를 수행하였다. 이후 이를 기초로 하여 환형관내의 유동과 안정성 그리고 열전달 해석 등 많은 다양한 연구들이 이루어졌다. Coney 등⁽²⁾은 안쪽축이 회전하는 환형관 유동을 수치해석적으로 해석하였는데, 경계층 이론을 적용하여 단순화시킨 Navier Stokes 방정식을 이용하여 다양한 반경비에 대한 해석을 시도하였다. Wereley 등⁽³⁾은 PIV를 이용하여 환형관내 유동의 속도분포, 축방향 레이놀즈수(Re)와 Vortex의 관계를 측정하였다. 하지만 Wereley의 실험은 낮은 회전속도, 저유량의 영역이었다.

환형관 형태의 유동은 회전하는 전기기계에서의 냉각문제, 유정 굴착작업에서의 유동, 지하 소구경 굴착에서의 유동 문제 등 여러 분야에서 발견할 수 있다. 특히 유정의 굴착작업은 많은 진동과 유동 교란을 발생시키며 낮은 축회전수로 작동되어진다. 따라서 케이싱 내를 통과하는 유동은 천이 영역에서의 유동 특성을 가지며 축방향 유동과 회전이 존재하는 천이 영역에서의 유동 특성 문제는 굴착 작업 시 야기되는 중요한 문제이다.

축 방향의 유동과 축 회전이 존재하는 환형관내 유동 특성은 유동 레이놀즈수(Re), 회전 레이놀즈수(Re_w), 로스비수(Ro), Taylor수(Ta) 등의 변수들에 의해 결정되어진다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관에서의 유동을 수치해석을 통하여 분석하였다. 축 방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 $Re=500\sim 2500$ 인 영역에서 안쪽축을 $0\sim 300\text{rpm}$ 으로 회전할 경우의 압력 손실값과 마찰계수값 등을 수치해석으로 계산하였고, 실험으로 측정한 결과와 수치해석 결과를 비교하였다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 3차원, 비압축성 유체에 대하여 수치해석 상용코드인 CFD-ACE를 사용하여 해석하였고 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 모멘텀 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}(\nabla \cdot \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

위 식에서 \mathbf{u} , ρ , ν , p 는 각각 유체의 속도, 밀도, 동점성계수, 압력을 의미한다. 위 지배방정식은 수학적으로 이산화하기가 편리하고 수렴성이 좋아 유체 유동장 해석에 많이 사용

주요어: 천이유동, 동심환형관, 나선유동, 표면마찰계수

1) 성균관대학교 기계공학과 대학원

2) 성균관대학교 기계공학부

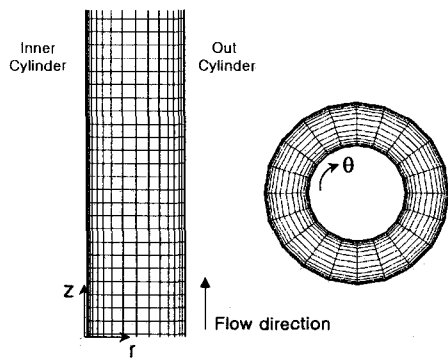


Fig. 1 Computational Grid

되는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였다. 대류항의 이산화는 1계 상류도식(Upwind Differencing Scheme)을 사용하였다. 본 환형관 유동장의 해석에 사용된 격자계는 Fig. 1에 도시하였다. 축방향으로 200개의 격자점을, 반경방향과 회전방향에 대해서는 똑같이 11개씩의 격자점을 주었고, 특히 반경방향은 양쪽 벽면으로 조밀하게 주었다.

본 연구에서는 기존의 물을 이용한 실험 조건과 똑같은 경우에 대하여 수치해석적으로 연구를 진행하였다. 본 연구에 관련된 변수들은 $R_i = 10\text{mm}$, $R_o = 19.2\text{mm}$, 축방향 길이 $z = 1.5\text{m}$, 반경비, $\eta = 0.52$ 이다. Re 와 축방향 회전수를 변화시키면서 압력손실값(dp/dz)을 계산하였고, 그 결과를 비교하였다. 수치해석 시 경계조건은 입구 유동은 유체가 축방향과 평행하게 유입하도록 가정하였고, 출구는 일정압력 조건을 주었다.

3. 결과 및 고찰

내경이 38.4mm인 바깥쪽 실린더는 고정되어 있고, 직경이 20mm인 안쪽축이 $N=0 \sim 300\text{rpm}$ 으로 회전하는 환형관 내에서 물을 작동유체로 하여 층류영역인 $500 < Re < 2500$ 구간에서 압력손실값을 Figs. 2, 3에 나타내었다. 축방향 레이놀즈수가 증가함에 따라 실험과 수치해석 모두 압력손실값이 증가하는 경향을 보이며, Fig. 3의 결과값의 차이는 회전수 증가로 인한 진동, 편심 등의 실험 오차값이 증가하는 영향때문인 것으로 사료된다.

안쪽축이 회전할 때 Taylor vortex는 원심력의 작용으로 인해서 발생하므로 Taylor vortex의 발달은 압력손실과 마찰계수값을 증가시키는 요인으로 작용한다.

축방향 레이놀즈수 변화에 따른 표면마찰계수값의 변화를 Figs. 4, 5에 나타내었다. 층류영역인 레이놀즈수 500이하에서는 유량제어가 힘들어 실험상으로는 측정하기가 곤란하였지만 해석상으로는 이 문제를 해결할 수가 있었다. 본 논문에서 500이하의 수치해석값을 표시하지 않은 것은 동일한 레이놀즈수에서 해석값과 실험값의 차이를 비교함에 있다.

회전수가 증가함으로써 마찰계수값은 증가하는 경향을 볼 수 있으며 해석값과 실험값의 오차는 증가함을 볼 수 있다. 이로부터 층류영역에서 회전수가 증가함에 따라 실질적인 경우에는 축 진동이 증가함으로써 이상적인 조건의 해석값과의 차이는 증가할 것이다.

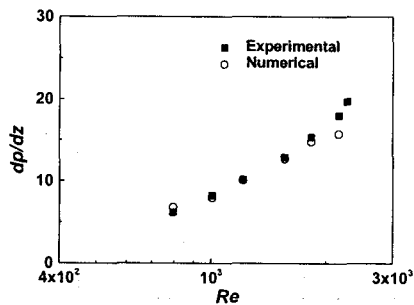


Fig. 2 Pressure loss of water as a function of Re in 100rpm

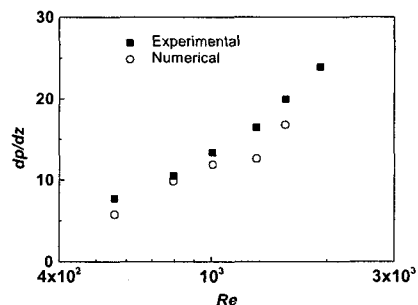


Fig. 3 Pressure loss of water as a function of Re in 300rpm

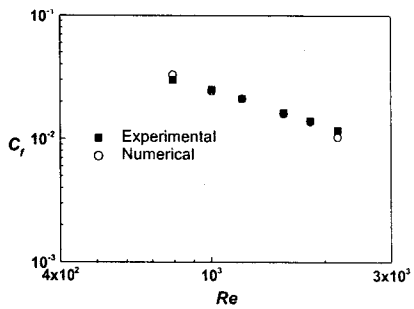


Fig. 4 Skin friction coefficient of water as a function of Re in 100 rpm

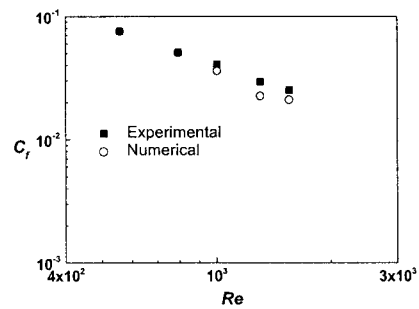


Fig. 5 Skin friction coefficient of water as a function of Re in 300 rpm

4. 결론

본 연구에서 회전속도, 유량, 작동유체가 압력손실과 마찰계수에 미치는 영향을 층류영역에서 실험과 수치해석으로 비교하였다. 안쪽축이 회전하는 환형관 내에서 유동에 관한 특성을 실험에 의해 수행하여 수치해석과 비교 분석하였다.

- (1) 환형관 압력분포 이해는 유체의 유변학적 특성을 이해하고 적용하는 기준을 제공한다.
- (2) 환형관 압력손실의 높은 기여는 장치의 연결 때문에 의한 영향으로부터 발생한다. 이러한 영향은 굴착 변수들의 최적조건(유량, 틈새)에 고려된다. 또한 회전에 의한 유동교란은 증진됨을 확인하였다.
- (3) 뉴튼유체에서 축회전이 없는 환형관 압력손실은 회전시보다 항상 작다.
- (4) 축 진동에 의해 발생하는 안쪽축의 횡방향 진동은 환형관 압력손실을 증가시키는 메카니즘을 제공함을 알 수 있다.
- (5) 층류영역에서 회전수 증가에 따라 해석값과 실험값의 차이가 증가하였다.

사사

본 논문은 에너지관리공단의 지원하에 자원기술 학술진흥사업비에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinders", *Phil. Trans. A*, Vol. 223, pp. 28 ~ 343.
- (2) Coney, J. E. R. and El-Shaarawi, M. A. I., 1974, "A Contribution to the Numerical Solution of Developing Laminar Flow in the Entrance Region of Concentric Annuli With Rotating Inner Walls", *J. Fluid Eng.*, Vol. 96, pp. 333~340.
- (3) 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.
- (4) 황영규, 김영주, 2000, "안쪽축이 회전하는 환형관내 헬리컬 유동장의 실험적 연구", *대한기계학회논문집B권*, Vol. 24, No. 6, pp.822~833.