

나선형 사각덕트 내의 압력강하

유승엽* · 윤주현* · 이두정*

Pressure Drop in a Helical Square Duct

Seung-Yeob Ryu, Juhyeon Yoon and Doo-Jeong Lee

Key Words : Helical Square Duct(나선형 사각덕트), Fanning Friction Factor(패닝마찰계수), Dean Number, Curvature Ratio(곡률비), Orifice Pressure Drop(오리피스 압력강하).

Abstract

Pressure drop at a helical square duct orifice is numerically evaluated. The orifice is installed at the entrance of a once-through steam generator tube to suppress flow instabilities. The calculated results are compared with the available experimental correlations, and showed good agreement. Effects of curvature ratio and characteristics of the secondary flow with Reynolds number are reported. Through the numerical simulations, pressure drop mechanisms were well understood inside the compact and complicated orifice geometry.

기호설명

a	hydraulic radius of the duct, m
d	duct width, m
D	diameter of a coil helix=2R, m
D _h	hydraulic diameter of the duct=2a, m
De	Dean number= $Re(a/R)^{1/2}=Re(D_h/D)^{1/2}$
f _c	curved-duct Fanning friction factor = $\tau_w/(\rho U_m^2/2)$
f _s	straight-tube Fanning friction factor
H	pitch, m
Re	Reynolds number= $\rho U_m D_h/\mu$
δ	nondimensional pitch= $H/(2\pi R)$
λ	curvature ratio=a/R

1. 서론

현재 원자력 연구소에서 개발하고 있는 일체형 원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)에서 도입하고 있는 관류형중기발생기는 과냉각상태의 급수를 받아들어 과열증기를 생산해 낸다. 따라서 냉각수는 전열관 내부에서 과냉각, 비등 그리고 과열증기상태로의 상변화를 하며 흐

른다. 이러한 비등전열관 내에서는 정적, 동적 유동불안을 나타낼 가능성이 많은 것으로 알려져 있다. 이러한 유동불안을 방지하기 위한 설계방안은 여러가지가 있을 수 있으나, 가장 현실적인 방안은 전열관 입구에 유동저항이 큰 오리피스를 설치하는 것이다[1]. 이 오리피스는 각각의 많은 전열관 입구에 설치해야 하므로 구조가 간단하고 compact 해야 하고 또한 유동불안을 방지하기 위해 요구되는 큰 압력강하를 일으켜야 한다. 위의 설계요건을 만족시키기 위해 채택된 오리피스 형상은 Fig. 1 에서와 같은 나선형 사각덕트이다. 이러한 나선형 사각덕트내 유동의 가장 큰 특징은 덕트의 곡률에 의한 원심력으로 생기는 2 차유동(Secondary flow)이다. 이 2 차유동은 관 바깥쪽 벽의 주유동속도를 증가시키고 관 안쪽의 주유동속도를 감소시킨다. 이로 인해 동일한 직관과 비교하여 볼 때 더 큰 마찰계수와 압력강하를 가지게 된다. 기존의 나선형 유동에 대한 연구는 주로 원형관에만 집중되어 있고 사각덕트에 대한 연구는 아주 적은 편이다[2]. 또한 공학적으로 이용할 수 있는 결과도 아주 제한적이다. 본 연구는 범용전산유체코드인 CFX 를 이용하여 설계된 오리피스의 압력강하 성능을 예측하여 보았고 계산된 결과를 기존의 상관식과 비교하여 보았다.

* 한국 원자력연구소

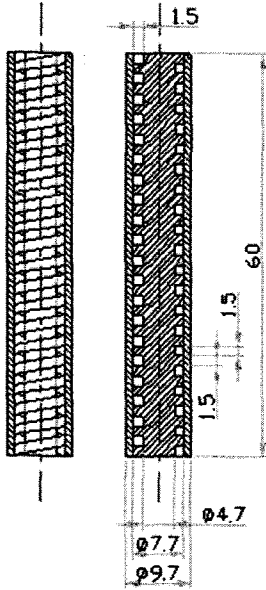


Fig. 1 Geometry of a orifice

2. 해석방법

2.1 지배 방정식

본 연구에서 다루고자 하는 유체는 물이고 속도 역시 음속에 비해 작으므로 압축성의 효과도 무시할 수 있다. 또한 나선형 관에서 층류에서 난류로 천이되는 임계 레이놀즈 수는 직관에 비해 더 크다는 것이 알려져 있다[3,4]. 다음은 Ito 가 제안한 임계 레이놀즈 수이다.

$$(Re)_{crit} = 2 \times 10^4 \left[\frac{d}{D} \right]^{0.32} \quad (1)$$

해석하고자 하는 오리피스 형상($d/D=0.2419$)에 대한 임계 레이놀즈 수는 약 12000 정도이고 실제의 레이놀즈 수는 5125 정도이므로 층류로 가정할 수 있다. 따라서 비압축성, 층류, 정상상태의 연속 방정식, 운동량방정식을 다음과 같이 직교 (Cartesian) 속도성분을 이용하여 일반 좌표계로 기술하면 다음과 같다[5].

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_j} [J \alpha^{mj} \rho U_m] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_j} [J \alpha^{mj} (\rho U_m U_i - T_{mi})] = 0 \quad (3)$$

여기서

$$T_{mi} = -p \delta_{mi} + \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x^m} \alpha^{mn} + \frac{\partial U_m}{\partial x^i} \alpha^{in} \right)$$

α^{mj} : the scalar product of ξ^j and \tilde{i}_m

ξ^j : general coordinate

J : Jacobian value of coordinate transformation

δ_{mi} : Kronecker delta (1 if $m=i$; 0 otherwise)

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 범용 전산유체코드인 CFX[6] 를 이용하여 해석을 수행하였다. CFX 코드는 Navier-Stokes 방정식의 해를 SIMPLE 알고리즘에 바탕을 둔 유한체적법을 사용하여 구한다. 대류항에 대한 차분은 QUICK scheme 을 사용하였고 수렴에 대한 판정은 각 계산 노드에서의 residual 합이 다음을 만족하였을 때이다

$$SR_\phi < 10^{-6} \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 u, v, w 를 나타낸다.

입구조건은 균일한 속도분포를 주었고 출구조건은 일반적으로 주는 Neumann 조건을 적용하였다. 계산영역은 Fig. 2 와 같이 완전 전개된 유동을 구하기 위해 축 방향으로 $0-540^\circ$, 즉 1.5 턴을 선정했다. 완전 전개된 유동에서의 압력 강하량을 구하기 위해 $180-540^\circ$, 즉 1 턴만 계산하였으며 이 영역을 선정한 이유는 나선형 관에서는 직관과 달리 완전 전개되기 위한 입구 길이가 더 짧아진다고 알려져 있기 때문이다[7]. 격자 의존도 테스트를 현 오리피스 설계치인 $Re=5125$, $\lambda=0.2419$, $\delta=0.077$ 인 경우에 대해서 수행하였다. 표 1 은 서로 다른 격자(단면 x 축방향)에 대해서 계산된 압력강하값을 비교하였다. 표 1 에서 900x300 격자가 충분하다는 것을 볼 수 있다.

Table 1 Grid dependency test ($Re=5125$, $\lambda=0.2419$, $\delta=0.077$)

격자수(단면 x 축방향)	Δp (Pa)
400x150	1917.07
900x150	1854.12
1600x150	1853.36
900x300	1855.66
1600x300	1855.01

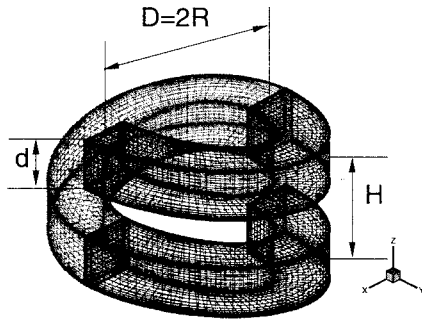


Fig. 2 Grid system

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과와의 비교

Huang 과 Gu[8]는 나선형 사각덕트에서 유량을 변화시켜가며 압력강하를 측정하는 실험을 하였다. Fig. 3 은 Huang 의 실험결과와 현 수치해석결과를 비교하였다. 그림 3 은 상대 마찰계수 f_c/f_s 가 Dean 수에 따라 증가함을 보여주고 있다. 그리고 수치 해석 결과와 실험결과가 거의 비슷하게 따라가고 있음을 알 수 있다. 여기서 $f_s(=16/Re)$ 는 직판에서의 마찰계수이다.

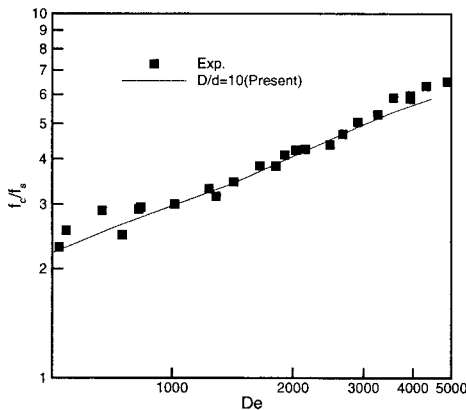
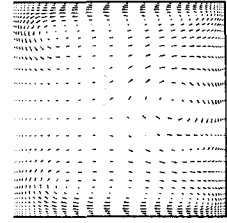
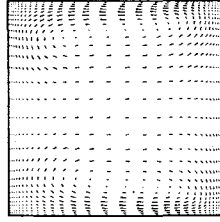
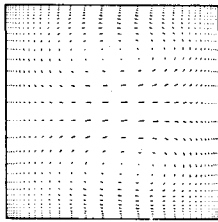
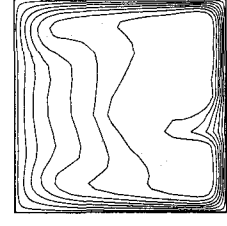
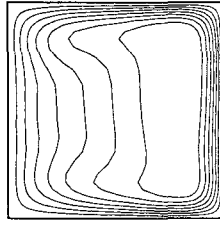
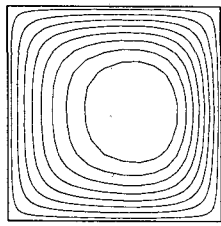


Fig. 3 Comparison of a relative friction factor (Numerical .vs. Experimental)

3.2 계산결과

곡관이나 나선형관에서 원심력은 유체의 유동을 증대시키기 때문에 유동의 마찰저항은 직관에 비해서 더 커지게 된다. 나선형 덕트에서 2 차유동과 유동 저항에 영향을 미치는 인자는 여러가지가 있지만 본 연구와 같이 유체의 성질이 일정하다고 가정한 경우 레이놀즈 수, 피치, 곡률비가 될 것이다. Fig. 4 는 두 가지 곡률비($\lambda=0.2419, 0.1210$)인 경우 레이놀즈 수에 따른 주유동 속도 분포와 2 차유동의 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 가장 큰 주 유동속도가 원심력 때문에 바깥쪽 벽으로 치우쳐 있는 것을 볼 수 있다. 곡률비가 커질수록 이런 경향이 커지는 것을 볼 수 있다. 상대마찰계수인 f_c/f_s 는 나선형 사각덕트에서 원심력 때문에 곡률비 λ 에 큰 영향을 받는다. 수력학적 지름이 같은 나선형 사각 덕트라면 코일의 지름 R 이 작아지면 원심력과 곡률비는 커지게 된다. 상대 마찰계수 f_c/f_s 는 원심력과 곡률비에 따라 증가하거나 감소하게 된다. 코일의 반지름이 무한대라면 나선형 덕트는 직관이 될것이다. 이런 경우 원심력과 곡률비는 0 이 되고 상대 마찰계수 f_c/f_s 는 1 이 된다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 주유동 속도와 2 차 유동이 증가 하기 때문에 레이놀즈 수는 상대 마찰계수나 2 차 유동에 중요한 인자이다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 유동이 증가하고 2 차유동의 형태가 아주 강해진다. 마찬가지로 상대 마찰계수인 f_c/f_s 도 증가한다. 그림 4 에서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 주유동속도와 2 차유동이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 어떤 레이놀즈 수(Dean 수)에 도달하면 바깥쪽 벽면 가까이에서 약한 2 차 유동 vortex 가 생기는 것을 볼 수 있다. 레이놀즈 수가 더 증가하면 벽면 가까이에서 생긴 2 차유동이 없어진다. 이 2 차유동의 생성되고 소멸되는 정확한 레이놀즈 수(Dean 수)는 덕트의 종횡비에 의존한다고 알려져 있다[9]. 또한 기존의 vortex 와 생성된 vortex 는 피치의 영향으로 서로 비대칭임을 알 수 있다.

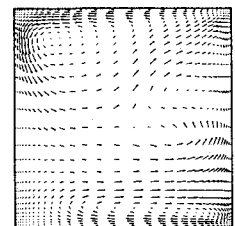
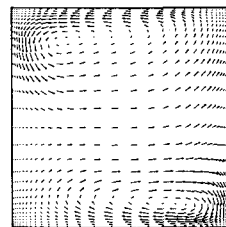
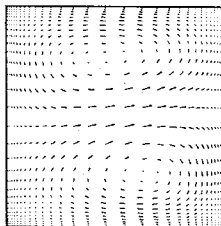
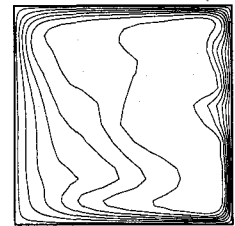
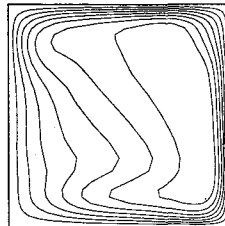
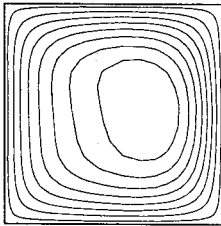
기존의 실험으로 얻어진 상관식에 대한 결과와 현 수치해석 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. White[10]는 나선 원형관에서 실험을 하여 Fig. 5 의 층류영역에서의 상관식을 제시하였다. 여기서 f_B 는 Blasius 마찰계수이다. 주로 얻어진 결과가 나선 원형관이나 곡관에 의한 실험으로 얻어졌으나 나선형 사각덕트에서도 같은 유사성이 발견되었다.



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

Fig. 4 Axial velocity and secondary flow pattern; $\lambda=0.1210$, $\delta=0.077$; (a)Re=51.2; (b)=512.4; (c)Re=1024.8 ; $\lambda=0.2419$, $\delta=0.077$; (d)Re=51.2; (e)=512.4; (f)Re=1024.8

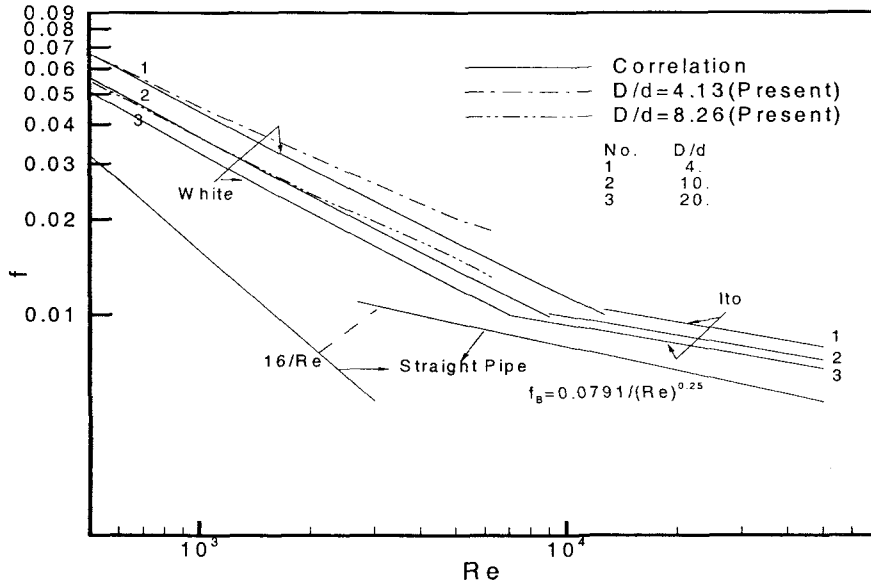


Fig. 5 Friction factor

낮은 레이놀즈 수에서는 사각 덕트나 원형관이 비슷한 결과를 나타내지만 레이놀즈 수가 증가함에 따라 압력강하, 즉 마찰계수가 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 원형관보다 나선형 사각덕트에서의 2 차유동이 더 강하기 때문이다. 또한 Fig. 5 에서 직선의 불연속점이 나타나는데 이는 나선형 원형관에서 층류에서 난류로 넘어가는 임계 레이놀즈 수가 존재함을 볼 수 있다.

현 오리피스 설계치는 통상 원자로 출력 20%를 기준으로 설계했으며 출력이 100%인 경우 증기발생기로 들어가는 급수유량이 5 배로 증가하게 된다. 이때 레이놀즈수는 5000 에서 25000 이 되어 완전 난류영역이 된다. 기존의 상관식으로서 난류일 경우 현 오리피스에 적용할 수 있는 상관식은 찾아보기 힘들다. 위의 수치해석 결과로서 추정해보면 어느 정도 원형관과 유사한 결과이나 레이놀즈 수가 증가하면서 마찰계수가 약간 증가하고 난류로 넘어가는 임계 레이놀즈 수가 증가함을 볼 수 있다. 그리고 난류 영역에서도 원형관에 비해 마찰계수가 커짐을 층류에서의 결과 곡선의 기울기로 판단할 수 있다. 그러므로 이는 추후에 실험을 통해 압력강하 성능을 검증하고 실험식을 개발할 필요가 있다.

4. 결론

관류형증기발생기의 유동불안을 방지하기 위한 목적의 전열관 입구 오리피스 압력강하를 수치해석을 통해 예측해 보았다. 설계된 오리피스는 나선형 사각덕트로서 2 차 유동과 높은 마찰계수가 중요한 특징이다. 비압축성, 층류, 정상상태 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법을 적용한 범용 전산유체코드인 CFX 를 이용하여 계산을 수행하였다. 계산 결과를 기존의 이용 가능한 실험 상관식과 비교하여 보았고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 2 차유동과 마찰계수는 곡률비와 레이놀즈 수(Dean 수)에 주로 영향을 받는다.
- 2) 레이놀즈수(Dean 수)가 적을 경우, 마찰계수는 원형관과 거의 비슷한 값을 갖지만 레이놀즈 수가 증가할수록 차이가 나며 더 커지게 된다.

나선형 사각덕트에서 피치의 영향도 2 차유동과 마찰계수에 영향을 미칠 것이라고 판단되며 층류에서 난류로 넘어가는 임계 레이놀즈 수와 난류영역

역에서의 상관식을 실험을 통해 개발할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Delhaye, J. M., et al., 1981, "Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering," McGraw-Hill Book Comp.
- (2) Jing-Wu Wang, and Andrews, J. R. G., 1995, "Numerical Simulation of Flow in Helical Ducts," *AIChE Journal*, Vol. 41, pp. 1071-1080.
- (3) Rogers, G. F. C., and Mayhew, Y. R., 1964, "Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 7, pp. 1207-1216.
- (4) Srinivasan, P. S., et al., 1970, "Friction Factors for Coils," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Vol. 48, pp. T156-T161.
- (5) Peric, M., 1985, "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph. D. thesis, Univ. of London.
- (6) CFX-4.2 User Manual, 1997, AEA Tech.
- (7) Shah, R. K., and Joshi, S. D., 1987, "Convective Heat Transfer in Curved Ducts, in *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*," Wiley, New York.
- (8) Huang, W., and Gu., D., 1989, "A Study of Secondary Flow and Fluid Resistance in Rectangular, Helical Coiled Channel," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 29, pp.480.
- (9) Cheng, K. C., Lin, R. C., and Ou, J. W., 1976, "Fully Developed Laminar Flow in Curved Rectangular Channels," *J. Fluids Eng.*, Vol. 98, pp. 41-48.
- (10) White, C. M., 1932, "Fluid friction and its relation to heat transfer," *Trans. Inst. Chem. Engrs, Lond.* Vol. 10, pp. 66-80.