

유동방향의 초원형 오리피스 형상 변화가 관유동에 미치는 동특성 연구

김윤제 · 이상섭*

성균관대학교 기계공학부, *한국원자력연구소 유체계통설계부

A Dynamic Characteristics of the Tube Flow with the Variations of the Axially-Positioned Super-Circled Orifice Shape

Youn J. Kim and Sang Sub Lee*

Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

유동방향으로 초원형 형상을 갖는 잘록한 관내의 압축성 유동에 관한 동특성을 수치적으로 연구하였다. MacCormack의 양해법, 즉 예측자/보정자 단계를 거친 시간 진행법을 이용하여 Euler 방정식의 해를 구하였는데, 관내 유동은 이차원, 비점성, 압축성 유동이라 가정하였다. 관의 직경비와 형상비가 압력분포에 미치는 영향을 광범위하게 고찰하였으며, 본 연구에서 개발한 전산프로그램을 이용한 수치 결과는 상용코드인 FLUENT를 이용한 결과와 비교하여 일치된 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract—Dynamic characteristics of compressible flow fields in super-circled constricted tube have been studied numerically. By applying MacCormack's explicit scheme, time marching method with predictor/corrector step, Euler equation is solved to find characteristics of fluid flow in a constricted tube where a two-dimensional inviscid compressible flow is assumed. The effects of tube diameter and aspect ratios on the pressure variations are discussed extensively. The results of the developed numerical schemes are compared with those of commercial FLUENT code, and show a good agreement.

1. 서 론

관의 형상 변화에 따른 유동 특성은 공학 분야의 중요한 연구 대상이 되어 왔으며, 이에 대한 해석은 연소 장치, 분무 건조기(spray dryers), 분사장치 또는 냉동기술등 공학적 응용분야 뿐만 아니라, 오리피스(orifice), 벤츄리(venturi), 노즐 및 밸브 설계 등 여러 계측 및 제어 기술 분야에 기초적인 자료가 되고 있다¹⁾. 관내의 흐름과 압력 용기로부터의 작업 유체 누설 등 계통의 성능 향상을 위한 제반 현상의 심도 있는 고찰을 위한 이러한 기초적인 유동장 해석은 중요한 의미를 갖는다. 특히, 원자력발전소의 핵증기공급계통(Nuclear Steam Supply System: NSSS)에는 발전소의 안전을 위하여 압력용기로부터 증기를 원자로 건물내 대기로 방출시키는 안전 감압계통 및 가압기 안전 밸브가 장치되어 있다. 이 장치를 통하여

방출되는 냉각재(coolant)의 유동현상 분석은 안전 관련 설비의 설계에 필수적으로 요구되는 설계 요건으로 NSSS 설계자와 BOP(Balance of Plants) 설계자간의 연계 업무 요건을 설정하기 위하여 정상상태의 유동 특성 및 관 유동에 대한 기초 자료가기 때문에 발전소 NSSS 설계자에게는 매우 중요하다고 할 수 있다.

지금까지 이러한 관내 유동을 해석함에 있어 대다수 많은 사람들이 사용한 기하학적 모델은 원형이나 직방형의 단면을 고려하였다. Cuffel²⁾은 원추형 노즐에 대해 공기 실험을 하였고, Strong & Alpay³⁾는 실제 유동 측정에 사용되는 파이프 오리피스를 통하여 층류 점성 압축성 유동의 수치 연구를 하여, 얇은 오리피스 및 직방형 오리피스의 관 직경비와 레이놀즈 수에 대한 상관 관계를 구하였다. Chan⁴⁾은 1차, 2차원 천음속 흐름(transonic flow) 유동장을 해석하기 위하여 상향 음해법(upwind

implicit scheme)을 개발하였으며, 축소-확대 노즐에 이를 적용하여 압력 분포가 실험치와 유사함을 보여 주었다. Nurick⁹⁾은 오리피스 내의 공동현상(cavitation)과 혼합(mixing)에 관하여 실험적 고찰을 하였는데, 오리피스의 형상에 따라 혼합의 균질성이 달라짐을 발견하였다. 즉, 직방형 오리피스가 원형의 오리피스 보다 혼합 효과가 양호함을 보여 주었다. 또한, Drikakis & Tsangaris⁶⁾는 비점성 압축성 노즐 유동에 대하여 부가 열(heat addition)이 미치는 영향을 고찰하였으며, Vradis와 Benton⁷⁾은 2차원 비압축성 정상상태의 Navier-Stokes 방정식의 해법을 개발하였다.

CANDU(CANadian Deuterium Uranium)형 중수로 원전에서는 원자로 출구 모관(Reactor Outlet Header: ROH)을 상호 연결하여 배관의 유동 안정성(stability) 확보를 도모하고 있는데, 기존의 ASME 표준 오리피스 형상 대신 spink 형태의 오리피스를 개발하여 사용하고 있다. 또한, 인체내 혈관은 시간이 경과할수록 혈관의 유로 면적 감소로 혈압이 증가되어 심장에 큰 부담을 주는 협착현상이 발생하게 되는데 이를 방지하기 위하여 혈관내의 유동 특성을 규명하기 위한 생체 유체역학적인 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다⁸⁾.

이와 같은 각종 유로 형상에 따라 개략적이고 포괄적인 설계 자료를 얻기 위하여 본 연구에서는 축 방향으로 초원형(super-circled) 형상을 갖는 잘록한 관내에서의 압축성 유동장 해석을 위한 전산 프로그램을 개발하고자 한다. 본 연구의 주목적은 계통 설계시 고려해야 하는 제반 유동의 안정성, 열전달 및 경계층 영향, 그리고 유체 유동 현상의 동적 특성을 분석하여 발전 시스템의 배관 계통과 기기 설계에 효율성을 높이고, 유동 조절 장치 및 측정 장치 개발, 인체 혈관내 유동특성연구 등 여러 분야에 이용할 수 있는 기초 자료를 얻고자 하는데 있다.

2. 이론적 배경

2-1. 지배 방정식

2차원 비정상 비점성 유동의 Euler 방정식은 직교 좌표계(orthogonal coordinates)에서 다음과 같은 보존형으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$D = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ (e+p)v \end{pmatrix} \quad (2, 3, 4)$$

위 식에서, u, v는 각각 x, y 방향의 속도를 말하며 ρ는 밀도, e는 전체 에너지를 나타낸다. 압력 P는 이상 기체 상태 방정식으로부터 다음과 같다.

$$P = (\gamma - 1) \left[e - \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right] \quad (5)$$

여기서, γ는 비열비(specific heat ratio)를 나타낸다.

보존형의 Euler 방정식을 사용하는 이점은 천음속 또는 초음속 유동 영역에서 항상 쌍곡선형을 유지하므로 자동적으로 충격파를 포착할 수 있으며, 비회전 운동이라는 가정을 포함하지 않기 때문에 시간에 대한 초기치 문제를 복잡성 없이 단순히 처리할 수 있다. 본 연구에서는 쌍곡선 형태(hyperbolic type)의 비정상 Euler 방정식인 식 (1)을 비교적 계산이 간단한 MacCormack의 양해법(explicit scheme), 즉 예측자/보정자 단계의 방법을 사용하였으며, 계산의 안정성을 도모하기 위하여 시간에 대해 적분함으로써 정상상태를 구하였다.

• 예측자(Predictor):

$$\overline{D}^{n+1} = D^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [E_{ij}^n - E_{i-1,j}^n] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [F_{ij}^n - F_{i,j-1}^n] \quad (6)$$

• 보정자(Corrector):

$$D^{n+1} = \frac{1}{2} \left\{ D^n + \overline{D}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} [E_{ij}^{n+1} - E_{i-1,j}^{n+1}] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [F_{ij}^{n+1} - F_{i,j-1}^{n+1}] \right\} \quad (7)$$

위 식에서 상첨자는 각각 시간 단계 n, n+1에서의 변수를 나타내며, 시간 단계 n에서의 변수들은 예측자 단계의 임시값 \overline{D}^{n+1} 을 계산한다. 다음에 예측자 \overline{D}^{n+1} 은 E^{n+1} 이나 F^{n+1} 이 유일한 임시 시간 단계이기 때문에 MacCormack의 양해법은 단지 2단계의 변수 저장값을 필요로 하는 장점이 있다.

예측자나 보정자는 공간상에서 각각 후향(backward)과 전향(forward) 차분법을 이용하였다. 또한 그와 반대의 차분법은 해를 구하는 데 아무런 영향을 미치지 않았다. 그러나 이러한 양해법(explicit scheme)은 수치 해석의 안정된 수렴을 위한, 시간 증분 Δt의 CFL(Courant Friedrichs and Lewy condition) 조건에 의하여 제한되므로 음해법(implicit scheme) 보다 많은 계산 시간을 요하는 단점이 있지만, 최근의 빠른 컴퓨터의 등장과 새로운 계산 기법의 개발로 많이 쓰여지고 있다. CFL 조건을 만족하는 비점성 유동의 시간 증분 Δt는 다음 식을 사용하였다.

$$\Delta t \leq \sigma \left[\frac{u}{\Delta x} + \frac{v}{\Delta y} + C \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \right]^{-1} \quad (8)$$

여기서, C는 국소(local) 음속을, 그리고 σ 는 안전계수를 나타내며 본 연구에서는 0.6을 사용하였다.

2-2. 경계 조건

경계 조건은 크게 유동의 입·출구 및 벽면에서의 조건으로 나눌 수 있다.

2-2-1. 벽면 조건

벽면에서의 경계 조건은 시간의 함수가 아니며, 각 변화량 값들을 계산할 때, 벽면을 통과하는 질량 플럭스가 없기 때문에 수직 방향의 압력 성분을 무시할 수 있다. 그리고 표면에서의 속도 성분을 수직과 평행 성분으로 나누어 수직 성분을 제거하면, 지배 방정식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial D'}{\partial t} + \frac{\partial E'}{\partial x'} + F' \frac{\partial V}{\partial y'} = 0 \tag{9}$$

그러나 위 식을 예측자/보정자 식에 적용할 때, y' 방향의 미분항 v 에 계산 격자점 밖의 v 값이 포함된다. 이 값은 대략 벽면에 근접한 계산 영역 내의 v 의 값을 취하여 계산할 수 있는데, 그 이유는 속도 v 를 표면의 한 점과 그 점의 상·하점 등을 통과하는 polynomial로 근사 대략화 시켜 미분항 y' 값이 벽면에서 없어지지 않기 때문에 1차의 polynomial 값을 이용하여야 한다.

2-2-2. 유동 입·출구면

정체압력 P_0 , 정체온도 T_0 등 유동 입구면에서의 조건이 외부로부터 주어지고 나머지 경계 조건은 내부 격자점의 외삽(extrapolation)에 의하여 구할 수 있다. 유동 입구면에서는 유동 특성 곡선을 따라 보존되는 리만 상수(Riemann invariant)를 이용하여 다음과 같은 속도 성분과 압력, 그리고 밀도를 구할 수 있다.

$$u_1 = Vel_1 \tag{10}$$

$$v_1 = 0 \tag{11}$$

$$P_1 = P_0 \left[1 - \frac{Vel_1^2}{2 C_p T_0} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{12}$$

또한, 리만 상수(R_1)와 균일 유동 조건으로부터 입구 속도(Vel_1)는

$$R_1 = \sqrt{u_1^2 + v_1^2} - \frac{2}{\gamma-1} C \tag{13}$$

$$Vel_1 = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} R_1 + \sqrt{\frac{4C_0^2}{\gamma^2-1} - 2 \frac{(\gamma-1)}{(\gamma^2+1)} R_1^2} \tag{14}$$

로 표시되며, $C_0 = \sqrt{\gamma R T_0}$ 로 정의된다. 아음속으로 나가는 유동 출구에서는 이상 출구 Mach 수로부터 정압(static

pressure)이 주어지게 되며, 나머지 값들은 내부점들로부터 외삽법에 의해 구할 수 있다. 유동 출구면에서 균일 유동으로부터 특성 곡선에 따라 상수값을 갖는 리만 상수를 R_E 라 하면, 다음 식을 이용하여 유동 출구면에서의 값들을 구할 수 있다.

$$\rho_E = \rho_1 \left(\frac{P_E}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \tag{15}$$

$$Vel_E = R_E - \frac{2}{\gamma-1} \sqrt{\frac{\gamma P_E}{\rho_E}} \tag{16}$$

$$u_E = Vel_E \tag{17}$$

$$v_E = 0 \tag{18}$$

2-3. 초원형 단면의 격자 생성

직교 좌표계에서 물리 영역(x, y)으로 기술된 지배 방정식 (1)은 곡선 좌표계의 계산 영역(ξ, η)으로 상사변환을 통하여 복잡한 형상을 정확히 묘사할 수 있으며, 계산 격자를 유동 형태에 따라 적절히 배치하여 주위의 경계 조건에 쉽게 적용할 수 있다.

$$\zeta = x \tag{19}$$

$$\eta = \frac{y(x) - y_l(x)}{y_u(x) - y_l(x)} \tag{20}$$

여기서, 하첨자 u, l 은 각각 잘록한 관로의 상·하 벽면을 나타낸다. 따라서 지배 방정식 (1)을 다음과 같은 보존형으로 변환할 수 있어 전술한 유한차분법(finite difference method)을 그대로 적용시킬 수 있다.

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = 0 \tag{21}$$

위 식에서,

$$D = D/J \tag{22}$$

$$E = (\xi_x E + \xi_y F)/J \tag{23}$$

$$F = (\eta_x E + \eta_y F)/J \tag{24}$$

를 나타내며, J 는 좌표변환에 의한 Jacobian을 말한다.

$$J = \frac{\partial(\xi, \eta)}{\partial(x, y)} = \frac{\partial \xi \partial \eta}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \eta \partial \xi}{\partial x \partial y} \tag{25}$$

본 연구에서는 유동해석을 위하여 Fig. 1-a에서의 같이 유동방향으로 초원형 오리피스를 도입하여 격자 생성(grid generation)의 기본 원리로 이용하였다. 즉, 식 (26)에서 n 값의 변화로 인한 형상을 잘록한 관에 적용하여 벽(wall)에서의 값으로 사용하였다.

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n + \left(\frac{y}{a}\right)^n = 1 \tag{26}$$

위 식에서 $n \rightarrow \infty$ 은 사각형을 나타내며, $n=2$ 는 원형 단면을, 그리고 삼각형의 단면은 $n=1$ 로 나타낼 수 있다 (Fig. 1-a 참조). 다양한 형태의 기하학적 구조를 고찰하기 위하여 입구의 관 직경을 D , 목(throat) 부분의 직경을 d , 그리고 초원형의 관 길이를 L 이라 하여 관 직경비(d/D)와 형상비(D/L)를 정의하였다. 또한, 유동해석의 편이성을 확보하기 위하여 H-형태의 격자 구조를 이용하였으며, 격자수는 축 방향으로 81개, 축방향과 수직으로 21개를 사용하였다(Fig. 1-b 참조). H-형태의 격자계는 잘록한 관 전과 후에서와 같이 전향도가 큰 부분에서는 밀도가 높은 격자계의 구성이 없이는 정확도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

IBM-PC/486으로 시간 간격 Δt 의 증가에 따른 평균 운동량의 차이인 허용 오차를 10^{-5} 로 주었을 때 계산시간은 30분 정도 소요되었다. 또한 격자계의 조밀 구조는 해의 안정성에 영향을 미치기 때문에 목 부분에서와 같이 상태량의 급속한 변화가 예상되는 부분은 다른 부분보다 조밀하게 하고 격자수를 훨씬 증가시키면 보다

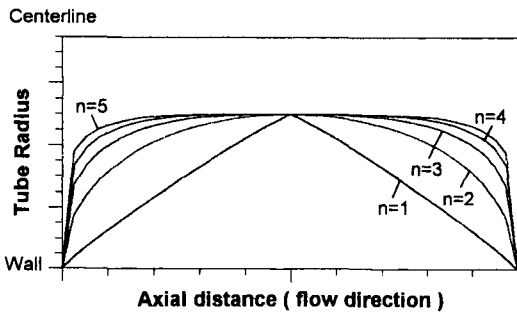


Fig. 1(a) Super-circled cross-sectional orifice shape along the flow direction.

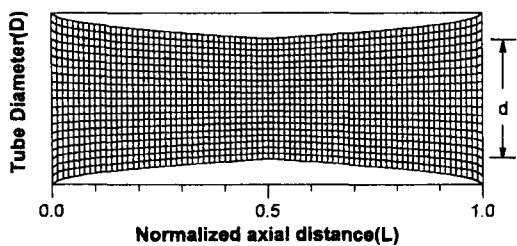


Fig. 1(b) Computational grid of super-circled constricted tube.

개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3. 수치해석 결과 및 분석

균일한 초기 조건으로 정상상태 해를 구할 때까지 식 (21)을 시간에 대해 적분함으로써 정상유동 상태의 해를 구할 수 있다. 이러한 균일 조건은 유선 방향을 따라 시간 간격 Δt 의 증가에 따른 평균 운동량의 차이가 10^{-5} 보다 작은 값을 가질 때의 상태량을 취하였다. 본 연구에서는 초원형의 잘록한 관내 유동장의 동적 특성을 MacCormack의 양해법을 이용하여 Euler 방정식을 해석하였으며, 속도 및 압력분포 등을 구하였다.

형상비가 0.2일 때, 관 직경비의 변화에 따른 유동 속도 분포는 Fig. 2에 도시하였는데, 포물선 형태의 속도 분포를 가지며 목을 지나 목 부분의 벽면 경계층 부근을 제외하고는 거의 일정한 속도로 유지하고 있음을 보여주고 있다. 그림에서 V_{max} 는 관 직경비가 0.75 일때의 최고속도를 나타낸다. 목 부위에 가까워질 수록 벽 근처의 속도비가 중심선에서의 속도비보다 더 빨라지는 양상의 속도 분포를 보이고 있는데, 이는 Cline⁷⁾의 해석 결과와도 일치한다.

Fig. 3은 형상비가 0.1로 일정할 때, 관 직경비의 변화에 따른 관벽에서의 압력 분포를 나타낸 것으로 가장 큰 영향을 미치는 것은 관입구 형태나 열역학적 상태가 아니라 관 직경비의 변화에 따른 차이임을 알 수 있다. 즉, 직경비가 0.75에서 0.9까지 증가함에 따라 압력비가 목 부근에서 더욱 현저하게 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 도시하지는 않았지만 형상비가 0.2인 경우도 마찬가지로 경향을 나타내었다. 여기에서 P_{max} 는 관 직경비가 0.75 일때의 최고 압력을 나타낸다. 인입구에서의 압력 구배는 일정하지만, 관 단면의 축소 정도에 따라 압력은 최소 단면적 지점에서 떨어지기 시작한다. 이

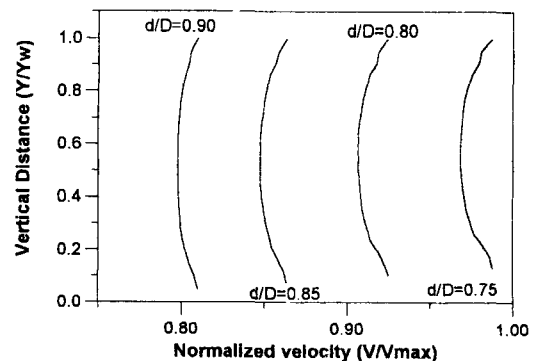


Fig. 2. Velocity profile in the super-circled constricted tube for $D/L=0.2$.

후에 유동 면적이 확장될 때 압력이 회복되고 유동은 다시 발달하기 시작한다. 압력 구배는 유동장이 완전히 발달함에 따라 음의 값을 갖게 되며, 관의 길이는 유체의 통과 시간과 직결된다. 길이가 짧으면, 즉 통과 시간이 짧으면 준안정상상태로부터의 복귀(recovery from metastability) 가능성이 낮아지므로 비평형도가 커지며 길이가 길면 마찰 손실이 크게 나타난다.

Fig. 4는 중심선에서의 관 직경비 변화에 따른 압력 분포를 나타내고 있다. 압력 변화의 경향은 식 (27)로 주어지는 1차원 해석에서 쉽게 예측할 수 있듯이 속도 변화와는 정반대의 양상을 보이고 있고, 관 직경비의 크기에 따라 압력 변화가 큼을 알 수 있다. 또한, 중심선에서 압력 분포가 벽면에서의 압력 분포 보다 완만한 것은 벽면 영향 및 격자 구조의 차이인 것으로 판단된다.

$$\frac{P_o}{P} = (1 + \frac{\gamma-1}{2} C^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (27)$$

관의 중심선에서의 속도 변화는 Fig. 5에 나타내었는데, $d/D=0.75$ 인 경우 목 부근까지는 속도가 급격하게 증

가하다가 목을 통과한 후 속도 변화가 다소 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 속도 변화도 압력 분포와 같이 직경비 및 형상비에 의한 영향이 큼을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 이용한 H-형태의 격자 구조에서 보는 바와 같이 축소부와 확대부에서의 단면적 증감에 의한 것으로 생각된다. 격자구조는 해의 안정성에 영향을 미치기 때문에 축소/확대되는 목 부근에서와 같이 상태량의 급격한 변화가 예상되는 부분은 다른 부분보다 좀더 조밀한 격자 구조를 요한다.

Fig. 6은 속도 contour를 나타내고 있는데, 유동속도 분포는 목 부근에 가까워질수록 벽 근처의 속도가 중심에서의 속도보다 빨라지고 목 하류 방향으로 가면서 완전히 발달된 포물선 형태의 유동을 보여주고 있으며, 특히 직경비 및 형상비의 크기에 따라 큰 변화가 있음을 나타내고 있다. 즉, 형상비 및 직경비가 변함에 따라 속도 발달이 빨라지고 있으며 속도 분포의 contour 선이 변화함을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 설명된 것과 같이 관이 축소 및 확대되므로 단면적의 증감 및 관의 형상에 따른 차이에 의한 것으로 판단된다.

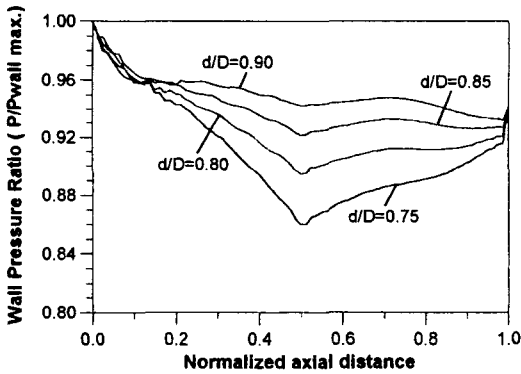


Fig. 3. Wall pressure distribution for $D/L=0.1$.

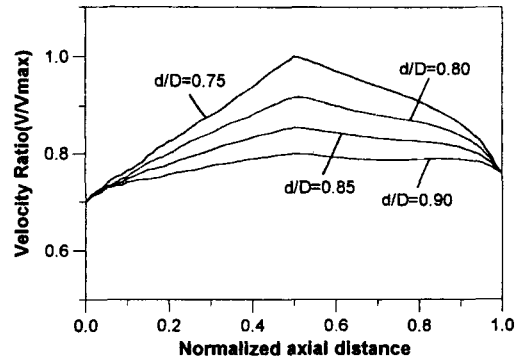


Fig. 5. Variation of velocity along the centerline for $D/L=0.1$.

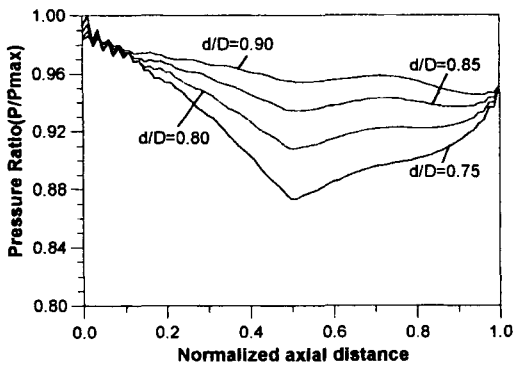


Fig. 4. Variation of pressure along the centerline for $D/L=0.1$.

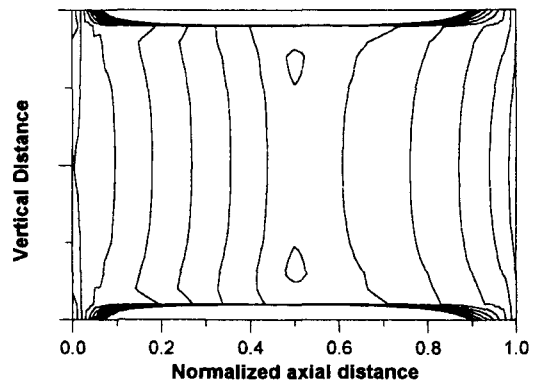


Fig. 6. Contour of velocity for $d/D=0.75$ and $D/L=0.2$.

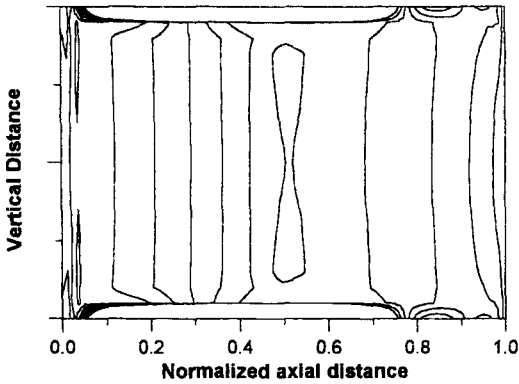


Fig. 7. Contour of pressure for $d/D=0.75$ and $D/L=0.2$.

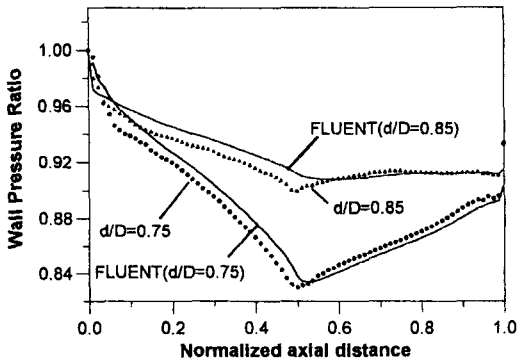


Fig. 8. Comparison of wall pressure distributions for $D/L=0.2$.

Fig. 7은 직경비 및 형상비의 크기가 각각 0.2, 0.75 일 때의 압력 분포 contour를 나타낸 것으로 Fig. 4의 중심선을 따라 나타낸 압력 분포에서 예측할 수 있듯이 압력 contour 선이 급격히 변화하고 있다. 이는 Fig. 6의 속도 분포에서와 같이 관 단면적 변화에 의한 영향임을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 전산 프로그램의 검증을 위하여 $D/L=0.2$ 일 때, MacCormack의 예측자/보정자 기법을 이용한 결과와 상용 코드인 FLUENTTM를 사용하여 구한 관벽면에서의 압력 분포를 Fig. 8에 비교 도시하였는데, 관 입구와 목 부분 등 변곡점을 제외하고는 거의 일치된 결과를 보여주고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

향후 광범위한 관 유동을 고찰하기 위하여, 축 방향으로 초원형 형상의 오리피스를 갖는 잘록한 관내에 비점성 압축성 유체가 흐른다는 가정을 하여, 유동 해석 전산 프로그램을 개발하였다. 이 전산 프로그램으로부터

얻어진 초원형 관내의 유동 특성을 요약하면 다음과 같이 기술할 수 있다.

유동장의 속도 분포는 관 입구에서 포물선의 형태로 시작되어 목 부분에서는 벽 근처의 속도가 중심에서의 속도보다 빨라지고, 목 하류로 가면서 완전히 발달된 유동의 형태를 보였으며, 유동 방향의 속도변화와 압력변화는 1차원 해석에서 예측할 수 있듯이 정반대의 양상을 나타내었으며, 압력 및 속도 분포는 관의 축소 및 확대부의 단면적 차이로 속도가 급격히 증가하다가 목을 지난 다음부터는 속도 변화가 완만해 짐을 알 수 있었다. 또한, 급격한 유동 물성치의 상태량 변화가 예상되는 변곡부위에서는 조밀 격자를 도입함으로써 안정된 해를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

하지만, 본 연구에서 개발한 프로그램을 보다 현실성 있게 적용하기 위해서는, 관 내부의 표면 조도 등 수력학적 마찰 손실 및 난류 영향 등을 고려해야만 할 것이다.

참고문헌

1. Sutter, S.L. and Bander, T.J.: "Measured air flow rate through micro-orifice and flow prediction capability," NUREG/CR-0066, PNL-2611, RT, July (1978).
2. Strong, A.B. and Alpay, S.A.: "Simultaneous variable solutions of the incompressible steady Navier-Stokes equations in general curvilinear coordinate system", *J. of Fluids Engineering*, **100**, 467-472 (1978).
3. Liang, S.M. and Chan, J.J.: "An improved upwind scheme for the Euler equations", *J. of Computational Physics*, **84**, 461-473 (1989).
4. Nurick, W.H.: "Orifice cavitation and its effect on spray mixing", *J. of Fluids Engineering*, 681-687 (1976).
5. Drikakis, D. and Tsangaris, S.: "Real gas effects for compressible nozzle flows", *J. of Fluids Engineering*, **113**, 115-120 (1991).
6. Vradis, G. and Bentson, J.: "A numerical study of the laminar viscous incompressible flow through a pipe orifice", *J. of Fluids Engineering*, **114**, 299-305 (1992).
7. Warsi, Z.U.A.: "Fluid Dynamics-Theoretical and Computational Approaches", CRC Press (1993).
8. Cline, M.C.: "Computation of two-dimensional viscous nozzle flow", *AIAA J.*, **14**(3), 295-296 (1976).
9. Yoo, S.S. and Suh, S.H.: "A Comparative study on constitutive equations of human blood", *The Korean J. of Rheology*, **6**(2), 157-164 (1994).
10. FLUENT Version 4.0, Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, U.S.A. (1991).