

<論 文>

내벽에 나선형 인공조도가 부착된 동심이중관에서
유동의 제측 및 수치계산

은 종 문* · 강 신 형**

(1986년 4월 29일 접수)

Measurements and Calculations of the Flow in a Concentric Annular
Pipe with Spiral Artificial Roughness on the Inner Pipe

Jong-Moon Eun and Shin-Hyoung Kang

Key Words; Roughness(조도), Turbulent Flow(난류유동), Concentric pipe(동심이중관)

Abstract

Developing flows in a concentric annular pipe are measured and calculated from the entry. Spiral artificial roughness are attached to the inner pipe. Mean velocity profiles and static pressure distributions are measured by a 3-hole pitot tube and a pressure transducer for various pitches, and compared with calculated results.

When the helical angle is 45°, considerable amount of the swirling velocity is observed. The swirl components of the velocity show about one-fifth of the axial velocity near the tip of roughness-wires. This experimental information is used as a boundary condition for the calculation of swirl velocity. A mixing length model integrated with the empirical roughness function is adopted in this paper. Effects of Reynolds numbers, pitches, and helical angles on the pressure drop in the pipe are estimated by numerical calculations.

기 호 설 명

A : 이중관 단면적 ($=\pi(R_o^2 - R_i^2)$)
 A^+ : van Driest damping function 계수
 B : 조도함수(식(13)에서 정의)
 D : van Driest damping function
 D_e : 등가 직경 ($=D_o - D_i$)
 D_i : 내관의 외직경
 D_o : 외관의 내직경

f : 마찰계수 ($=\frac{D_e \cdot \Delta P}{2\rho U_m^2 L}$)
 H : 조도높이
 h^+ : 무차원 조도높이 ($=\frac{u_* H}{\nu}$)
 L : 이중관 길이
 l : 혼합거리
 \dot{m} : 단위시간당 유량 ($=\rho A U_m$)
 P : 압력
 ΔP : 관길이 L 에 대한 정압차
 P : 피치

* 서울대학교 대학원, 현재 삼성전자(주)

** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- r : 반경방향좌표
- R_i : 내관의 외반경
- R_o : 외관의 내반경
- R_e : Reynolds 수 $\left(= \frac{D_e \cdot U_m}{\nu} \right)$
- u : 축방향 국소평균속도
- u_r : 축방향 마찰속도 $(= \sqrt{\tau_r / \rho})$
- $\overline{u'v'}, \overline{v'w'}$: 난류응력
- u^* : 축방향 무차원 국소평균속도 $(= u/u_r)$
- U_m : 축방향 평균속도
- v : 반경방향 국소평균속도
- w : 회전방향 국소평균속도
- x : 축방향 좌표
- y : 반경방향 좌표
- y^* : 반경방향 무차원거리 $\left(= \frac{u_r \cdot y}{\nu} \right)$
- δy_0 : 조도에 의해 증가되는 혼합거리
- δy_0^* : δy_0 의 무차원값 $\left(= \frac{u_r \delta y_0}{\nu} \right)$

회람문자

- α : 조도의 나선각
- δ_i : 내관 외벽에서 경계층 두께
- δ_o : 외관 내벽에서 경계층 두께
- θ : 회전방향 좌표
- κ : von Karman 상수
- λ : 혼합거리 상수
- μ' : 점성계수
- μ'' : 난류점성계수
- μ'_{eff} : 등가점성계수 $(= \mu + \mu'')$
- ν : 동점성계수 $(= \mu / \rho)$
- ρ : 밀도
- τ_i : 내관 외벽면 전단응력
- τ_o : 외관 내벽면 전단응력
- Ψ : 유동함수
- ω : 무차원 유동함수 $\left(= \frac{\Psi - \Psi_1}{\Psi_e - \Psi_1} \right)$

1. 서론

열교환기의 성능을 향상시키기 위한 연구가 오래전부터 행해지고 있으며 그 중에서도 열전달면에 돌기를 부착하여 난류를 촉진시키거나 핀 등으로 전열면을 확장시키는 방법등이 주로 연구의 대상이 되어 왔다.

인공조도에 의한 열전달 촉진 및 압력손실 특성에

관한 연구로는 Dipprey 와 Sabersky⁽¹⁾, Webb⁽²⁾, Maubach⁽³⁾, Lewis⁽⁴⁾ 등이 있다. 특히 Donne 와 Meryer⁽⁵⁾는 이전의 많은 연구자료와 추가 실험에서 얻은 자료로 마찰계수 및 열전달계수를 조도의 함수로 나타내었다.

일반적으로 열교환기는 열전달 측면에서 열전달계수를 증가시키고 유동 측면에서 마찰계수를 감소시키는 것이 바람직하나 인공조도를 부착하면 열전달계수는 증가하나 마찰계수의 증가를 수반하게 된다. 그래서 가능한 압력손실을 줄이면서 열전달을 촉진시키는 연구가 수행되어 왔다.

Han 등⁽⁶⁾, Gee 와 Webb⁽⁷⁾, Sethumadhavan 과 Rao⁽⁸⁾는 원형관의 내벽에 나선형 조도를 부착하였을 때 실험을 수행하여 열전달계수 및 마찰계수를 조도와 상관관계식으로 나타내었으며, 링 형태의 조도가 있는 경우보다 동일 압력손실에 대한 열전달계수가 증가됨을 보였다.

홍진관과 최영돈⁽⁹⁾은 동심 이중관의 내관 외벽에 링형으로 조도를 부착하고 일정 피치비에 대하여 Reynolds 수를 변화시키면서 열전달 특성을 연구하였으며, 강정석 과 최영돈⁽¹⁰⁾은 동심 이중관의 내관 외벽에 나선형으로 조도를 부착하여 열전달 특성을 측정하고 링형조도의 경우와 비교하는 연구를 하였다. 노승탁등⁽¹¹⁾은 동심 이중관의 내벽에 원형 돌기를 링형으로 부착하여 굽기와 피치를 변화시키면서 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다.

나선형 인공조도가 있는 경우에는 축대칭 유동이 되지만 벽 근처에서 선회속도가 유도된다 이에 따라서 유동특성, 조도함수, 열전달특성이 링형 인공조도가 있는 경우와 다르게 되는 원인이 되리라 생각된다. 따라서, 본 논문은 내관 외벽에 나선형 인공조도가 있는 동심 이중관 사이의 유동특성을 관찰하기 위해 일정 나선각에 대하여 피치비를 변화시키면서 선회속도, 축방향속도, 압력을 측정하였으며, Han 등⁽⁶⁾의 연구에서 발표된 조도함수를 도입하여 유한차분법으로 수치계산을 수행하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 채택한 동심 이중관의 내관 외벽에 부착된 나선형 인공조도 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 유체를 일정 물성치를 갖는 비압축성 뉴우튼 유체라 하고, 축대칭 정상유동으로 생각한다. 축방향 운동량 방정식에서 축방향 속도가 지배적이므로 축방향

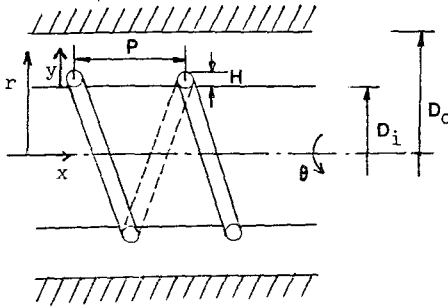


Fig. 1 Geometry and parameters

으로 확산은 무시하고 반경방향 속도를 무시하면 평균된 난류유동의 연속방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같이 표시된다.

연속방정식

$$\frac{\partial(\rho ru)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho rv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

x 방향 운동량 방정식

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial y} - \rho r \overline{u'v'} \right) \tag{2}$$

y 방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\rho w^2}{r} \tag{3}$$

θ 방향 운동량 방정식

$$\rho u \frac{\partial(rw)}{\partial x} + \rho v \frac{\partial(rw)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu r^3 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{w}{r} \right) - \rho r^2 \overline{v'w'} \right] \tag{4}$$

외벽과 내벽에서 경계조건은 점착조건에 의해 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u\left(x, \frac{D_c}{2}\right) &= 0, \quad v\left(x, \frac{D_c}{2}\right) = 0, \quad w\left(x, \frac{D_c}{2}\right) = 0 \\ u(x, 0) &= 0, \quad v(x, 0) = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

한편 나선형 조도가 있는 내벽에서 유체는 주유동에 반대방향으로 항력과 이에 수직방향으로는 양력을 받게 된다. 이때 양력과 항력의 비를 알수 있다면 조도에 따른 일정한 위치에서 축방향 전단응력에 상대적으로 선회방향의 전단응력을 경계조건으로 택할 수 있다. 그러나 인공조도에 의하여 주기적으로 변하는 유동해석문제를 본 연구에서는 평균적인 개념을 사용하여 단순한 조도개념으로 다루고 있다. 따라서 조도높이에서 선회속도를 축방향속도의 크기에 따라 다음과 같이 가정하였다.

$$w(x, H) = C \cdot u(x, H) \tag{6}$$

여기서, C는 엄밀하게 보아서 피치비, 조도높이 및 유동조건에 따라 달라지리라 생각된다. 나선각이 0°이거나 90°이면 물리적으로 보아서 선회속도가 발생치 않기 때문에 C=0이 되겠으나 그렇지 않으면 C는 양수가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 피치비가 작아지면 주로 나선각의 함수일 것으로 생각되어 나선각이 45°인 경우 실험결과에 의해서 합당한 C의 값을 정하기로 하였다.

식(3)에서 선회속도는 원심력에 의하여 압력을 변하게 하고 이는 식(2)에서 x방향의 압력구배를 유도한다. 그러나 본 연구의 범위에서는 그 영향이 작다고 생각되어 고려하지 않았다. 따라서 압력은 x만의 함수라고 생각하였다. 계산과정에서 dp/dx가 구해져야 하지만 적당하게 가정한 후 연속방정식을 만족하도록 조정되어야 한다.

운동량 방정식 (2)와 (4)의 난류응력은 Boussinesq 가정에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$-\overline{u'v'} = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \tag{7}$$

$$-\overline{v'w'} = \frac{\mu_t}{\rho} r \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{w}{r} \right) \tag{8}$$

난류점성계수 μt는 Prandtl의 혼합거리 이론을 사용하면 다음과 같이 표시된다.

$$\mu_t = \rho l^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

여기서, l은 혼합거리이며 이때 혼합거리 l은 Kays와 Crawford⁽¹²⁾등 거친 벽면근처 유동에서의 혼합거리로 제안한 식을 사용하면 내관 외벽부에서의 혼합거리 l은 다음과 같다.

$$l = \kappa(y + \delta y_0) \quad (y < \lambda \delta_i / \kappa - \delta y_0) \tag{10}$$

$$l = \lambda \delta_i \quad (y \geq \lambda \delta_i / \kappa - \delta y_0) \tag{11}$$

여기서, κ는 von Karman 상수이며 0.41로 하였고, δi는 내관 외벽에서 경계층 두께이며, λ는 0.12로 하였다. δy0는 조도에 따른 혼합거리의 증가량이며 조도함수로부터 다음과 같이 구하였다.

$$\delta y_0 \approx h e^{-\kappa B} \tag{12}$$

여기서, B는 조도함수이며, Han 등⁽⁶⁾은 실험을 통하여 다음과 같은 실험식으로 제안하였다.

$$B = 4.9(h^+/35)^n / [(\phi/90^\circ)^{0.35} \cdot (10/(P/H))^n \cdot (\alpha/45^\circ)^{0.57}] \tag{13}$$

$$m = -0.4(h^+ < 35)$$

$$0(h^+ \geq 35)$$

$$n = -0.13 \quad (P/H < 10)$$

$$0.53(\alpha/90^\circ)^{0.71} (P/H \geq 10)$$

$$h^+ = \frac{u_\tau H}{\nu}$$

여기서, α 는 나선각이며, ϕ 는 조도의 형상에 따라 결정되어지는 값이며, H 는 조도높이다. 본 연구에서는 조도의 형상보다 나선각의 영향에 대한 유동특성을 고려하기 위해 ϕ 는 조도의 형상이 사각단면의 경우와 같이 90°로 하였다.

외관 내벽부에서는 매끈한 벽이라고 보고 van Driest damping function D 를 사용하면 다음과 같이 표시된다.

$$l = \kappa y_0 D \quad (y_0 < \lambda \delta_0 / \kappa D) \quad (14)$$

$$l = \lambda \delta_0 \quad (y_0 \geq \lambda \delta_0 / \kappa D) \quad (15)$$

여기서 δ_0 는 외관 내벽에서 경계층 두께이며, 관벽으로부터 최최속도의 99% 되는 점까지의 거리이다. y_0 는 외관 내벽으로부터 거리이고 D 는 다음과 같다.

$$D = 1 - \exp(-y^+ / A^+) \quad (16)$$

여기서, A^+ 는 26으로 하였다⁽¹²⁾.

3. 수치해석

연속방정식을 만족하는 유동함수를 도입하여 독립변수들 (x, y) 에서 (x, Ψ) 로 변환하는 von Mises 변환을 이용하면 운동량 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} - \rho u \frac{\partial}{\partial \Psi} \left(r^2 \rho u \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial \Psi} \right) = - \frac{dp}{dx} \quad (17)$$

$$\rho u \frac{\partial (rw)}{\partial x} - \rho u \frac{\partial}{\partial \Psi} \left[r^4 \rho u \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial \Psi} \left(\frac{w}{r} \right) \right] = 0 \quad (18)$$

여기서, 유동함수 Ψ 는 연속방정식에서 다음과 같이 정의된다.

$$\rho ur = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (19)$$

식(17)과 식(18)을 무차원 유동함수 ω 을 도입하여 Patankar-Spalding 좌표계로 변환하였다.

$$\omega = \frac{\Psi - \Psi_1}{\Psi_E - \Psi_1} \quad (20)$$

여기서 Ψ_1 와 Ψ_E 는 내관 외벽 및 외관 내벽에서의 유동함수이다. Patankar-Spalding 좌표계로 변환된 운동량 방정식은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \omega} \left(C \mu_{eff} \frac{\partial \phi_1}{\partial \omega} \right) = d \quad (21)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \omega} \left[r^2 C \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\phi_2}{r^2} \right) \right] = 0 \quad (22)$$

여기서, $\phi_1 = u$

$$\phi_2 = rw$$

$$C = \rho ur^2 \mu_{eff} / (\Psi_E - \Psi_1)^2$$

$$d = - \frac{dp}{dx} / (\rho u)$$

축방향 압력구배는 forward marching 계산과정동안 축방향 속도분포가 바뀌면 식(19)로 부터 계산된 외관의 반경은 실제로 경계조건으로 주어진 외관의 반경과 차이가 생기게 되므로 연속방정식을 만족하도록 Patankar and Spalding⁽¹³⁾이 제시한 방법을 사용하면,

$$\frac{dp}{dx} = \frac{F'}{A} - \frac{m U_m}{A^2} \cdot \frac{dA}{dx} \quad (23)$$

로 표시된다.

여기서, F' 는 관의 단위길이당 벽면의 마찰로 인한 힘이며, $\frac{F'}{A} = \frac{2(\tau_0 R_0 + \tau_i R_i)}{(R_0^2 - R_i^2)}$ 로 표시되는데 τ_0 와 τ_i 는 내관 및 외관의 벽면 전단응력이다. m 는 단위시간당 유량이며, A 는 관의 단면적으로 $\pi(R_0^2 - R_i^2)$ 이다. $\frac{dA}{dx}$ 는 계산한 단면적과 실제로 주어진 단면적의 차로서 계산과정 동안 연속방정식을 만족하도록 차이를 보상에 주는 항이다.

4. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 등심 이중관의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 등심 이중관의 내관은 외경 31.8mm, 두께 2mm, 길이 3m의 스테인리스 강관을 사용하였고, 외관은 내경 79mm, 두께 2mm, 길이 2.4m의 아크릴관을 사용하였다. 관 입구에는 균일한 속도를 얻기 위해서 bell mouth를 부착하였다. 내관의 외벽에 부착된 나선형 인공조도는 설치의 편리를 위해서 외경 1.5mm의 비닐와이어를 사용하여 피치를 쉽게 변화시킬 수 있도록 하였다. 실험장치 출구에서는 3개의 가는 볼트와 너트를 사용하여 내관을 고정하였으며 입구에서는 유체유동에 영향을 주지 않도록 내관을 입구 밖으로 연장하여 Jiffy Zack를 사용하여 고정하였다. 등심 이중관의 출구는 송풍기의 흡입구에 연결시켰으며 송풍기 풍량은 3.9 m³/min, 구동동력 3.3 kW, 회전속도 2,900 rpm, 정압 1,000 mmAq의 원심송풍기를 사용하였다.

유동의 확립 여부를 확인하기 위하여 내경 2mm의 정압측정용 탭을 입구로부터 50mm, 150mm, 250mm, 400mm의 위치에 설치하였으며, 400mm되는 곳부터는 200mm 등간격으로 설치하였다.

등심 이중관에서 평균속도를 측정하는데 직경 1.7mm 피토우관과 3공 피토우관을 사용하였다. 피토우관을 통한 압력전달은 압력변환기를 통해 strain amplifier에서 나오는 애널로그 신호를 A/D converter에서 디지털 값으로 변환하여 마이크로 컴퓨터(Apple II plus micro-computer)를 사용하여 평균압력과 평균속도값

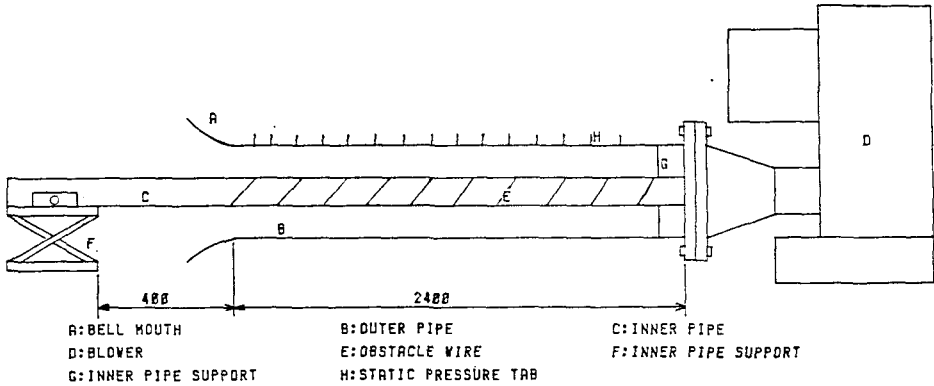


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

을 알 수 있도록 하였다. 직경 1.2 mm 3공 피토우관 (3-hole pitot tube)은 보정한 후 각 측압공의 압력을 피토우관과 같은 방법으로 연결하여 속도의 크기와 방향 즉 x, θ 성분 값을 알 수 있었다.

압력 측정은 외관 외벽에 설치된 정압측정용 탭을 사용하여 피토우관과 같은 방법으로 연결하여 압력값을 알 수 있도록 하였다.

피토우관은 자동 이송장치를 사용하여 이송하였다. 조도의 높이를 1.5 mm, 나선각을 45°로 고정하고 피치비가 30, 15, 7.5 일 때 측방향에 따라 압력, 선회속도분포, 측방향속도분포를 측정하였다.

5. 계산과 실험결과 및 검토

본 논문에서 채택한 유동의 특성은 이중 동심관의 형상, 인공조도의 높이, 나선각, 피치비, Reynolds 수 등이 유동특성을 나타내는 변수이다. 우선 일정 나선각에 대한 조도의 간격, 즉 피치에 따른 유동특성 변화에 관심을 두었기 때문에 다음 변수를 아래와 같이 고정하고 피치를 변화시켜가며 실험 및 계산을 수행하였다.

- $D_i/D_o=0.403$
- $H/D_o=0.032$
- $\alpha = 45^\circ$
- $R_o = 42,000$
- $P/H = 7.5, 15, 30$

매끈한 이중관에서 측방향에 따른 압력변화의 실험치와 계산치를 Fig. 3에 나타내었다. 실험에서 압력구배는 입구로부터 유동이 확립되어가면서 일정하게 나타남을 알 수 있었다. 이때 계산치는 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 나선형 인공조도가 있는 이중관에서

각각의 피치비에 대하여 측방향에 따른 압력변화의 실험치와 계산치를 Fig. 3에 함께 나타내었다. 실험에서 압력강하는 피치비가 작을수록 증가하였다. 이것은 피치비가 작을수록 나선형 인공조도에 의해 형상저항 (form drag)이 증가하기 때문이다. 이때 계산치는 실험치와 대체로 일치하나, 피치비가 30 일 때는 계산치의 압력이 실험치보다 전반적으로 작았으며, 피치비가 15와 7.5 일 때는 실험치보다 크게 나타났다. Han⁽⁶⁾의 실험에서는 $P/H < 10$ 이면 압력강하가 오히려 줄어드는 경향을 보이고 있으나 본 연구에서는 $P/H = 7.5$ 까지도 나타나지 않았다.

매끈한 관에서 측방향 속도분포의 실험치와 계산치를 Fig. 4에 나타내었다. 실험에서는 최대속도를 보이는 위치가 내관쪽으로 편심되었다. 이것은 내관 외벽에서보다 외관 내벽에서 유동저항이 크기 때문이다. 이때 계산결과는 실험결과와 같이 최대속도를 보이는 위치가 내관쪽으로 편심되었으며, 유동이 완전히 확립되었을 때 측방향 속도 분포의 계산치는 실험치와 잘

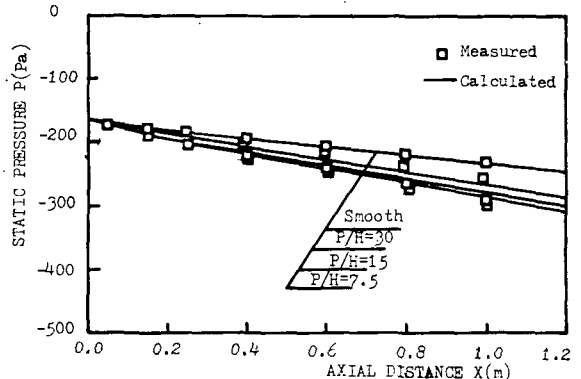


Fig. 3 Calculated and measured static pressure distributions ($R_o=42000$)

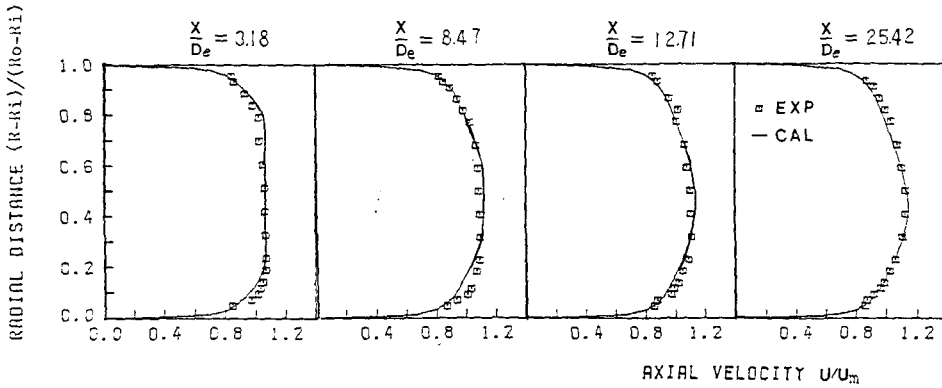


Fig. 4 Calculated and measured axial velocity profiles(smooth, $R_e=42000$)

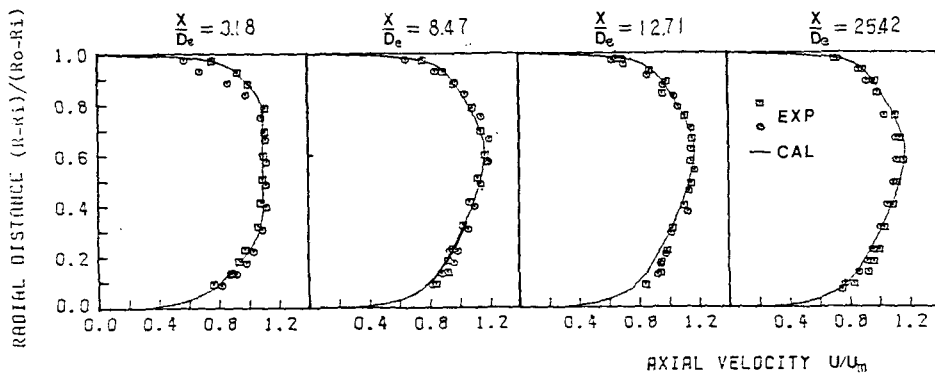


Fig. 5 Calculated and measured axial velocity profiles ($P/H=15$, $\alpha=45$, $R_e=42000$):
 □ on wires, ○ between wires

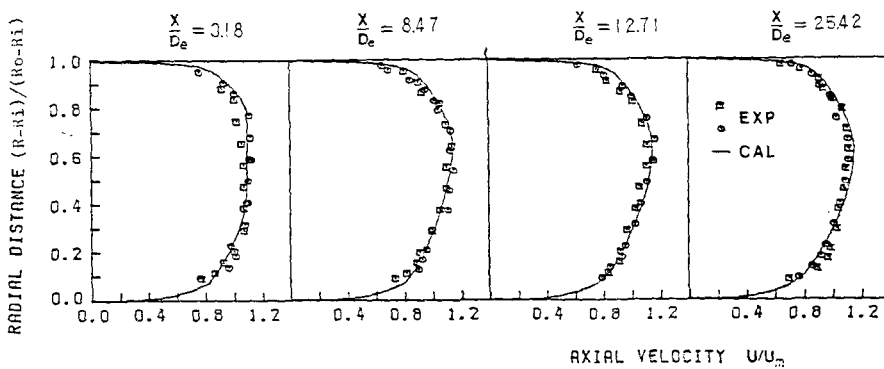


Fig. 6 Calculated and measured axial velocity profiles($P/H=7.5$, $\alpha=45$, $R_e=42000$):
 □ on wires, ○ between wires

일치하였다. 그러나 유동이 확립되어 가면서 벽 근처에서 계산치가 실험치와 잘 일치하지 않았으며, 특히 $x/D_e=8.47$ 일 때 계산치와 실험치는 벽 근처에서 잘

일치하지 않았다. 이것은 계산에서는 관 입구에서 축방향속도가 균일하다고 가정하였으나, 실제 실험에서는 실험장치의 입구조건상 관 입구의 벽 근처에서 유

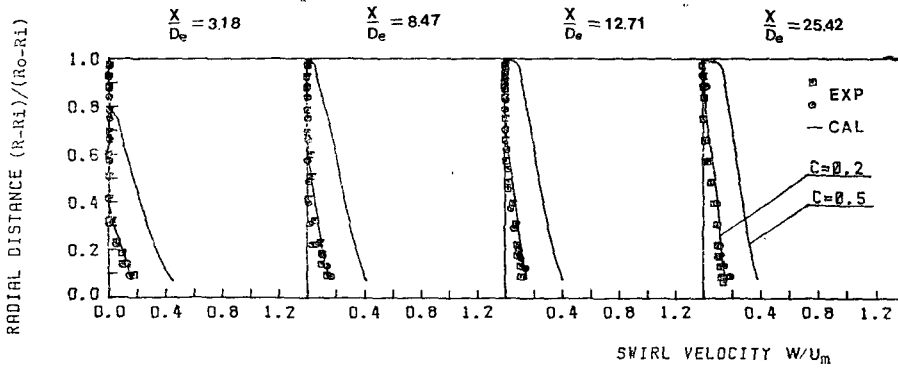


Fig. 7 Calculated and measured swirl velocity profiles ($P/H=15$, $\alpha=45$, $Re=42000$) :
 □ on wires, ○ between wires

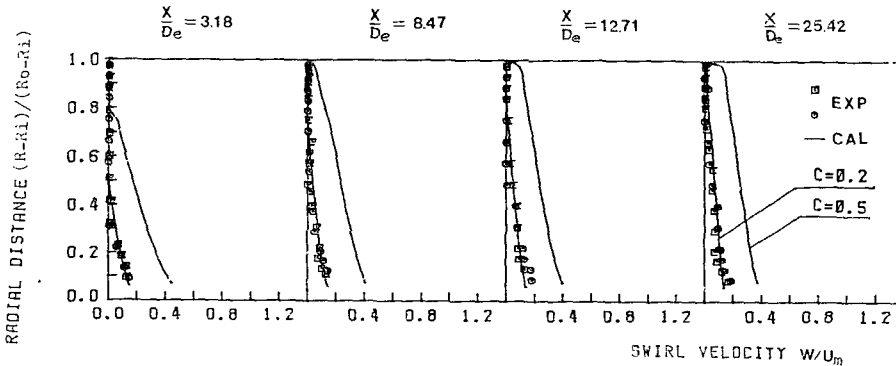


Fig. 8 Calculated and measured swirl velocity profiles ($P/H=7.5$, $\alpha=45$, $Re=42000$) :
 □ on wires, ○ between wires

등이 균일하지 않았기 때문이라고 생각할 수 있다. 나선형 인공조도가 있는 이중관에서 피치비에 따른 축방향 속도분포의 실험치와 계산치를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이때 실험치는 내관을 회전시켜 조도와 조도사이의 가운데 및 조도가 위치한 곳에서 각각 측정된 값이다. 실험결과는 최대속도를 보이는 위치가 매끈한 이중관의 경우와는 달리 외관쪽으로 편심되었다. 이것은 내관 외벽부 유동이 나선형 인공조도에 의해 저항을 받아 축방향 속도가 감소하기 때문이다. 피치비가 작을수록 내관 외벽부에서 저항이 증가하기 때문에 최대속도를 보이는 위치가 외관쪽으로 더 편심되었다. 이때 계산결과는 실험치와 대체적으로 일치하였다, 그러나 계산에서 얻어진 속도분포는 주기적으로 변하는 속도 분포가 아니고 그 평균값에 해당한다 따라서 실험치는 인공조도 근처에서는 측정위치에 따라서 계산치와 축방향 속도분포가 일치하지 않을 수도 있다.

선회속도분포의 실험치와 계산치를 피치비에 따라 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 축방향 속도와 같이 실험치는 이중관의 내관을 회전시켜 조도와 조도사이의 가운데 및 조도가 위치한 곳에서 각각 측정된 값이다. 실험결과에 의하면 선회속도가 나선형 조도가 있는 내관 외벽 근처에서 발생하였으며, 유동이 확립되어 가면서 외관쪽으로 전달되었다. 나선각이 45°이고, 피치비가 15 이하이면 선회속도에 대한 피치비의 영향은 작았다. 이때 C를 0.5로 가정하고 계산한 결과는 실험치와 일치하지 않았으며, C를 0.2로 가정하고 계산한 결과는 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 나선각이 0° 이거나 90° 이면 물리적으로 보아서 선회속도가 발생하지 않기 때문에 C=0이다. 따라서, 나선각이 45° 일때 가장 큰 선회속도가 유도되리라 생각되며 나선각이 0°와 90°사이에서 C는 0과 0.2사이의 값을 가지게 될것이다. 그러나 일반적인 조도높이에 대한 나선각에서도 이 값이 합당한지 본 연구에서는 알 수 없으며, 이에 대하여는 앞으로 실험을 통한 연구가 더 필요

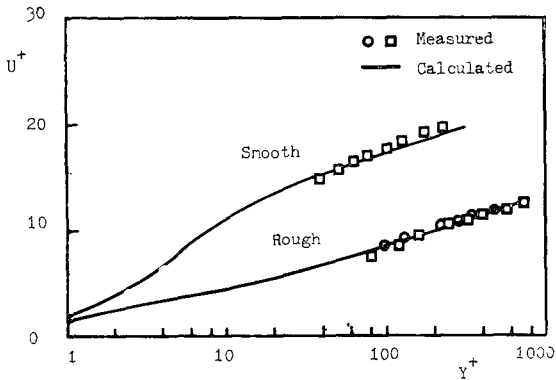


Fig. 9 Calculated and measured axial velocity distribution on inner pipe ($R_e=42000$, $X/D_e=25.42$)

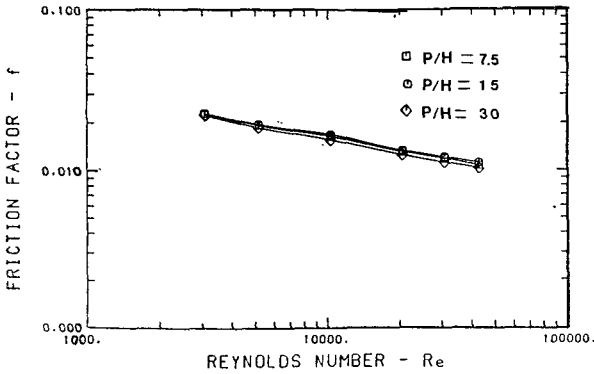


Fig. 10 Calculated friction factors as function of Reynolds number

요하다.

유동이 확립되었을 때 계산 및 실험에서 얻은 내관의 벽근처에서 무차원 축방향대수 속도분포를 Fig. 9에 나타내었다. 이때 계산치와 실험치는 비교적 잘 일치하였다.

나선형 인공조도가 있는 무차원 축방향 속도분포(u^+)가 매끈한 관의 경우에 비하여 무차원 반경방향좌표(y^+)축으로 이동한 현상을 볼 수 있다. 이것은 나선형 인공조도에 의해서 내관 외벽에서 전단응력이 증가하여 무차원 반경방향거리(y^+)는 증가하는데 반하여 무차원속도(u^+)는 상대적으로 감소하기 때문이다. 이때

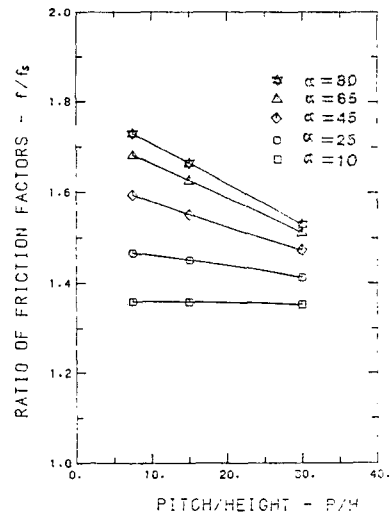


Fig. 12 Calculated ratio of friction factors as function of pitch ratio

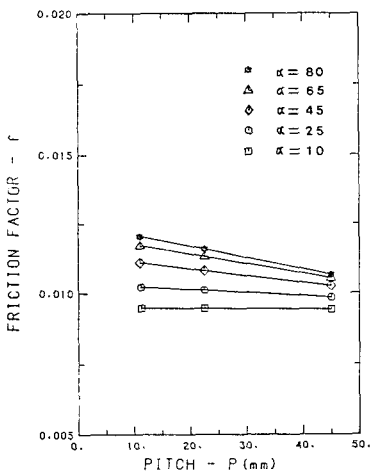


Fig. 11 Calculated friction factors as function of pitch

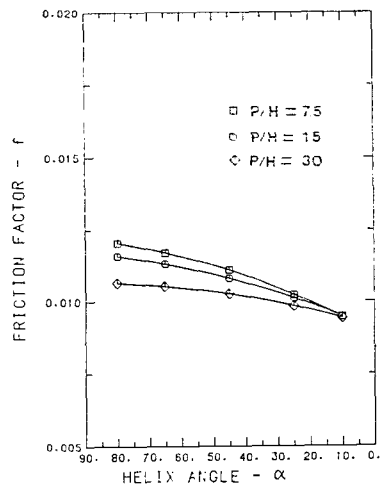


Fig. 13 Calculated friction factor as function of helix angle

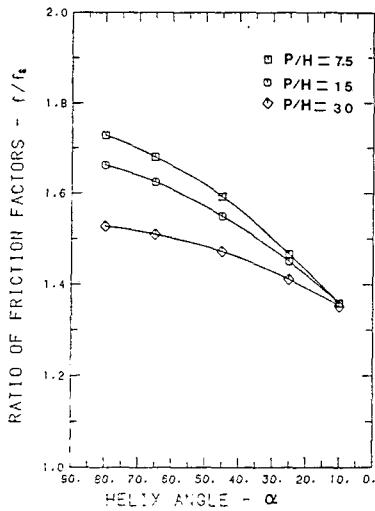


Fig. 14 Calculated ratio of friction factors as function of helix angle

계산치와 실험치는 비교적 잘 일치하였다.

이상에서 설명된 바와 같이 제한된 범위의 실험결과와 계산결과의 비교를 통해서 선회속도를 제외하고는 유동계산이 합리적으로 수행된다고 생각하였다. 그래서 나선각, 피치비, Reynolds 수를 변화시키면서 계산을 하여 이들이 압력손실에 어떤 영향을 미치는지 그 경향을 연구하였다. 나선각이 45°이고, 피치비가 30, 15, 7.5 일때 Reynolds 수를 변화시키면서 계산한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이때 일정 Reynolds 수에서 마찰계수에 대한 피치비의 영향은 매우 작았으며, Reynolds 수를 증가시키면 마찰계수는 감소하였다. 나선각에 대하여 피치를 변화시키면서 계산한 결과를 Fig. 11에 나타내었으며, 매끈한 관에서 마찰계수와의 비를 구하여 Fig. 12에 나타내었다. 이때 피치비가 작을수록 마찰계수는 증가하였으며, 나선각이 클수록 마찰계수에 대한 피치비의 영향은 컸다.

피치비에 대하여 나선각을 변화시키면서 계산한 결과를 Fig. 13에 나타내었으며, 매끈한 관에서 마찰계수와의 비를 구하여 Fig. 14에 나타내었다. 나선각이 작을수록 마찰계수는 감소하였으며, 피치비가 클수록 마찰계수에 대한 나선각의 영향은 작았다. Han 등⁽⁶⁾에서 $\alpha < 45^\circ$ 이면 열전달계수가 급히 감소하는 경향을 보이므로 $\alpha = 45^\circ$ 가 적당하다고 하였으나 본 연구에서는 열전달 측면을 다루지 않았다.

6. 결 론

내관의 외벽에 나선형 인공조도가 있는 이중 동심관

사이의 유동특성에 관하여 입구에서부터 유동이 완전히 발달할때까지 실험 및 수치계산을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정 나선각에 대하여 피치비를 변화시키면서 유동특성을 측정한 결과는 다음과 같다.

매끈한 이중관의 경우보다 나선형 인공조도를 부착한 이중관에서 압력강하가 크며 나선형 인공조도가 있는 이중관에서 본 연구의 피치비 범위에서 피치비가 작을수록 압력강하는 증가하였다.

측방향 속도분포를 보면 최대속도를 보이는 위치가 매끈한 동심이중관에서는 내관쪽으로 편심되었으나 나선형 인공조도를 부착한 이중관에서는 외관쪽으로 편심되었다.

선회속도가 나선형 인공조도에 의해 내관 외벽 근처에서 발생하였으며 유동이 확립되어가면서 외관쪽으로 전달되었다. 이때 나선각이 45°고 피치비 15가 이하이면 선회속도에 대한 피치비의 영향은 작았다.

(2) Han 등⁽⁶⁾이 제안한 조도함수를 사용하여 유동장을 계산한 결과는 다음과 같다.

압력변화와 속도 분포의 계산치는 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 매끈한 이중관에서 압력강하는 점성에 의한 벽에서 전단응력에 의해 일어난다. 그러나 나선형 인공조도를 부착한 이중관에서 압력강하의 주된 원인은 나선형 인공조도에 의한 형상저항(form drag) 때문이라 생각된다. 따라서 마찰계수는 피치비와 나선각에 의해 좌우된다.

측방향 속도분포를 보면 나선형 인공조도를 부착한 이중관에서는 최대속도를 보이는 위치가 매끈한 이중관의 경우와는 달리 외관쪽으로 편심되었다. 이것은 내관 외벽유동이 형상저항(form drag)에 의해 감소하기 때문이다.

선회속도에 대한 내관 외벽에서 경계조건으로 조도높이에서 선회속도를 측방향 속도의 크기에 비례하게 가정하였다. 나선각이 45°이고, 피치비가 15이하일 때 C 를 0.2로 가정하고 선회속도를 계산한 결과는 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 나선각이 0°이거나 90°이면 물리적으로 보아서 선회속도가 발생치 않기 때문 $C=0$ 이다. 따라서 나선각이 45°일때 큰 선회속도가 유도된다고 생각되므로 나선각이 0°와 90°사이에서는 C 는 0과 0.2사이의 값을 가지게 될 것이다. 그러나 일반적인 조도높이에 대한 나선각에서도 이 값이 합당한지 본 연구에서는 알 수 없으며, 이에 대하여는 앞으로 실험을 통한 연구가 더 필요하다.

(3) 일정 나선각에 대하여 피치비를 변화시키면서

Han 등⁽⁶⁾의 연구에서 발표된 조도함수를 사용하여 계산한 결과는 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 따라서 Han 등⁽⁶⁾이 제안한 조도함수를 본 해석에 적용하는 것이 타당하다고 생각되어 나선각, 피치비 등을 변화시키면서 계산을 수행하여 이들이 압력손실에 미치는 영향을 알 수 있었다.

일정 나선각에 대하여 피치비가 작을수록 마찰계수는 증가하며, 나선각이 클수록 마찰계수에 대한 피치비의 영향은 크다. 일정 피치비에 대하여 나선각이 작을수록 마찰계수는 감소하며, 피치비가 작을수록 마찰계수에 대한 나선각의 영향은 크다. 따라서 열전달 성능이 심하게 영향을 받지않는 범위에서 압력손실을 줄이기 위해서는 가급적 나선각이 작고, 큰 피치의 나선형 인공조도를 설치하는 것이 바람직하겠다.

참 고 문 헌

- (1) D.F. Dipprey and R.H. Sabersky, "Heat and Momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 329~353, 1963
- (2) R.L. Webb, E.R.G. Eckert and R.I. Goldstein, "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601~617, 1971
- (3) K.Maubach, "Rough Annulus Pressure Drop Interpretation of Experiments and Recalculation for Square Ribs", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 2489~2498, 1972
- (4) M.J. Lewis, "Roughness Functions, The Thermohydraulic Performance of Rough Surface and The Hall Transformation-An Overview", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 809~814, 1974
- (5) M.D. Donne and L. Meyer, "Turbulent Convective Heat Transfer from Rough Surfaces with Two-Dimensional Rectangular Ribs", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 583~620, 1977
- (6) J.C. Han, L.R. Gillicksman and W.M. Rohsenow, "An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened surface", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1143~1156, 1978
- (7) D.L. Gee and R.L. Webb, "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1127~1136, 1980
- (8) R. Sethumadhavan and M.Rata Rao, "Turbulent Flow Heat Transfer and Fluid Friction in Helical-Wire-Coil-inserted Tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 1833~1845, 1983
- (9) 홍진관, 이기명, 최영돈, "인공조도가 있는 이중 동심원관의 난류 열전달 해석", 대한기계학회논문집, 제 7권, 제 3호, pp. 301~312, 1983
- (10) 강정식, 최영돈, "인공조도가 이중 동심원관의 난류 열전달에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 9권, 제 3호, pp. 335 ~ 344, 1985
- (11) 노승탁, 이택식, 강신형, 김진오, "형상변화에 의한 열교환기의 열전달 성능 향상(1)", 대한기계학회논문집, 제 9권, 제 1호, pp. 71~80, 1985
- (12) W.M. Kays and M.E. Crawford, "Convective Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, pp. 161~202, 1980
- (13) S.V. Patankar and D.B. Spalding, "Heat and Mass Transfer in Boundary Layer", *Inter. Text Books*, 2nd, 1970