

돌출형 거칠기벽이 있는 동심환형관의 유동에 대한 마찰계수

안 수 환*
(1998년 9월 21일 접수)

Friction Factors for Flow in Concentric Annuli with Rib-Roughened Wall

Soo Whan Ahn

Key Words: Roughness Pitch Ratio (거칠기 피치비), Radius Ratio (반경비), Concentric Annulus (동심환형관), Rough Core Tube (거친내관), Friction Factor (마찰계수)

Abstract

The combined effects of radius ratio and roughness pitch ratio on the turbulent fluid flow characteristics of the fully developed flow in the annular tubes with rib-roughened core walls were determined for Reynolds number ranging from 12,000 to 66,000. To understand the underlying physical phenomena responsible for friction factor enhancement, measurements of velocity profiles and zero shear stress and maximum velocity positions were combined to propose the friction factor correlation. Friction factors were found to be a function of the roughness pitch ratio and radius ratio.

1. 서 론

인공의 거친 표면을 이용함으로써 열교환기의 열전달이 증가되는 현상에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 그러나 거친 표면을 설치함으로써 바람직하지 않는 펌핑동력을 상승시키는 압력강하가 부수적으로 증가한다. 그러므로 열교환기 등의 설계에서 열전달촉진용 거친 표면에 대한 마찰계수의 자료가 필요하다. 열교환기 등과 같은 열관련 산업기기의 열전달효과를 향상시키기 위해 설치하는 채널내의 거칠기 구조에 관한 마찰계수특성의 연구는 주로 사각채널, 원관 그리고 환형관(annular tube)등에 대해 수행되고 있는 실정이다. Nikuradse⁽¹⁾가 먼저 높은 밀도의 모래입자들이 정착된 원형파이프내의 모래입자높이를 거칠기높이로 정의 하였다. 그러나 실제

산업에서 이용되고 있는 거칠기들은 벽면거칠기 밀도가 대부분 매우 낮으므로 Nikuradse가 제안한 모래입자거칠기높이에 직접 적용하는데는 다소 어려움이 따른다. 그러므로 Schlichting⁽²⁾은 마찰저항공식. (Fanning form) $\lambda = 8(u_* / \bar{u}) =$

$$(2 \log R/k_* + 1.74)^{-2}$$

으로부터 임의의 거칠기에 대한 동가모래입자높이 (k_*)를 구하였으며, Schlichting⁽²⁾은 3면은 매끈하고 한 면만 일정크기의 거칠기가 설치된 사각채널에서 거칠기에 대한 실험을 행하여 동가모래입자높이를 $5.75 \log(k_*/k) = 8.5 - B$ 로 정의하였다, 여기서 k 는 실제 거칠기 높이, B 는 상수이다. 그리고 Moody⁽³⁾는 시중의 파이프들에 대해 광범위한 마찰저항을 측정하여 동가모래입자높이와 레이놀즈 수의 변수로 나타내었다. 최근 사각채널내의 거칠기 효과에 대해서는 Burggraf,⁽⁴⁾ Hong & Hsieh⁽⁵⁾ 그리고 Youn et al.⁽⁶⁾이 조사한바 있다.

그 중에서 Burggraf⁽⁴⁾는 대향(對向)의 양측벽면에 거칠기피치비(P/ϵ)가 10, 거칠기 높이비(ϵ/De)가 0.055인 거칠기 요소를 가진 거친 사각채

* 회원, 경상대학교 기관공학과, 해양산업연구소

널에서 난류유동특성에 대하여 연구하였다. Youn et al.⁽⁶⁾은 아래벽면에만 사각돌출거칠기요소(square-ribbed roughness element)가 설치된 사각채널내의 마찰계수를 CHAM사(영국)에서 개발한 PHOENICS 소프트웨어패키지를 이용하여 거칠기 높이비(ϵ/De)가 0.01에서 0.04사이에서, 거칠기 피치비(P/ϵ)가 10에서 40의 변화에 대해 이론 해석하였다. Youn et al.⁽⁶⁾의 이론해석은 대수속도형상(logarithmic velocity profile)을 기초로 사각형거칠기높이를 동가모래입자(equivalent sand grain) 거칠기에 해당하는 거칠기 높이로 변환한 벽함수(wall function)로부터 마찰계수를 예측하였다. 그러나 이러한 연구는 거칠기피치비(P/ϵ)가 7 근처에서 마찰계수가 가장 크고 그로부터 멀어질수록 점점 작아지기 때문에⁽⁷⁾ Youn et al.⁽⁶⁾의 연구범위는 실제 산업기에 적용하는 데에는 다소 제한적이다.

거칠기가 설치된 환형관의 마찰계수에 관한 연구는 Lawn & Hamlin⁽⁸⁾ 그리고 Garimella & Christensen⁽⁹⁾에 의해서 수행되었다. Lawn & Hamlin⁽⁸⁾은 내관외벽에만 거칠기피치비(P/ϵ)가 7.2의 거칠기 요소를 설치한 동심환형관에서 직경비가 0.405와 0.521에 대해 이중피토투브(double pitot tube)와 x형 열선풍속계를 사용하여 최대속도와 전단응력이 0인 지점, 속도형상 그리고 마찰계수를 실험적으로 조사하여 직경비 효과에 대한 실험적 자료를 제시하였다. Garimella & Christensen⁽⁹⁾은 내관에만 나선홈관(spirally fluted tube)을 설치한 환형관에서 23종의 광범위 나선홈관들에 대한 마찰계수의 실험을 행하였다. Garimella & Christensen⁽⁹⁾은 나선 홈의 환형관이 매끈한 이중관보다 마찰계수가 층류유동에서는 2배까지, 난류유동에서는 10배까지 증가함을 보였고 나선홈관(spirally fluted tube)이 내관인 동심환형관에 대한 마찰계수의 실험식을 구하였다. 본 연구와 같은 거칠기구조를 가진 거친환형관(roughened concentric annuli)의 마찰계수 예측방정식은 Schlichting⁽²⁾이 제안한 등가모래입자를 이용한 벽함수로는 내벽면의 곡률 때문에 구하기 어렵다. 이러한 실정에서 본 연구자들은 거친 동심환형관의 마찰계수에 대한 관심을 가지고 양벽면에 거칠기가 있는 경우⁽¹⁰⁾와 외벽면에 만 거칠기가 있는 경우⁽¹¹⁾에 대한 마찰계수들을 실험적 연구를 행하였으며 그 실험 자료

를 바탕으로 적분법에 의한 수치계산에 의해 외벽면에 만 거칠기가 있는 동심환형관에 대한 마찰계수를 예측한바 있다.⁽¹²⁾ 그러나 실제 연구를 행한 연구자 이외는 상수 등의 적용에 어려움이 있다.

그러므로 본 연구는 사각돌출형거칠기가 내관에 만 설치된 동심환형관(concentric annulus)인 경우에 대한 실험조사로서, 거칠기요소들중 유동특성에 가장 영향을 많이 미치는 파라메타인 직경비와 거칠기피치비를 동시에 조사하기 위해 거칠기피치비(P/ϵ)가 2에서 직경비가 0.26, 0.39 그리고 0.56인 경우와 직경비가 0.4에서 거칠기피치비(P/ϵ)가 2, 4, 8, 그리고 16인 경우에 대해 각각 실험을 행하여 직경비와 거칠기피치비에 대한 마찰계수효과를 밝혀 수치계산법을 이용하지 않고 마찰계수를 예측할 수 있는 실험식을 제안하고자 한다.

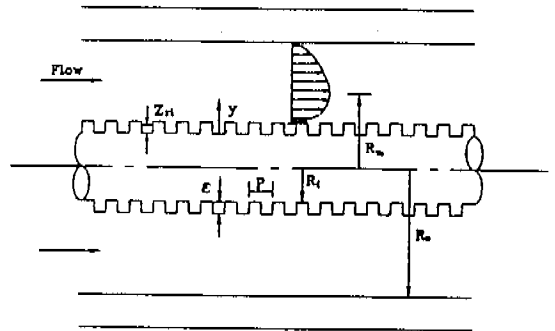


Fig. 1 Details of roughness elements.

2. 실험장치 및 방법

실험은 크게 두단계로 행하였다. 첫째, 직경비의 효과를 조사하기 위해 시험부의 외관의 내부직경은 97mm이고 내관은 25mm, 38.2mm, 그리고 54mm인 거친관으로 하였고, 둘째, 거칠기피치/높이의 비에 대한 효과를 조사하기 위해 외관의 내경을 97.4mm이고, 39.2mm인 내관의 외경에 $P/\epsilon = 2, 4, 8, 16$ 인 거친관용 Fig. 1과 같이 구성하였다. 작동유체는 공기를 사용하였고 공기는 맨틀 부분에 위치하는 단단송풍기(0.8 kW, 3400 RPM A/C motor)에 의해서 공기여과기를 통해서 bell mouth부분을 거쳐 시험부로 유입된다.

실험장치의 전체길이는 6.1 m이다. 외관의 재질은 구리합금이고, 내관은 첫 번째 단계에서는 아크릴이고 둘째 단계에서는 연강을 사용하였다. 거칠기는 선반으로 거칠기 높이 1.5mm, 폭 1.5mm인 사각돌출형 거칠기를 제작하였다. 실험장치 중에서 거친 관의 길이는 4 m이다. 측정 부는 측정의 편심성 때문에 투명아크릴관을 외관으로 사용하였다. 모든 경우에서 완전 발달된 영역 (fully developed region)이 입구에서 1.28m 지점부터임을 확인하였고 측정 부는 입구에서 3.75m 떨어진 곳에 위치하였다. 이송장치는 특별히 제작된 이송기구를 이용하였다. 내관은 동판을 사용했으며 반경방향으로 위치조절이 가능한 3점 이동장치에 의해서 지지하였다. 시험 부의 내관과 외관의 편심여부는 다이얼게이지로 측정하였고 최대편심량은 1.4% 정도이었다. 튜브 처짐에 의한 편심량은 무시할 수 있었다. 각종측정에서 직경비효과를 조사할 때는 직경 4 μ 의 텅스텐 X형 열선프로브와 정온도형 열선풍속계(CTA, TSI Model 1054 A)를 사용하였고, 측정된 난류성분은 범용파형분석기(D6000 Model 611, Data Precision Inc.)를 사용하여 개인용 컴퓨터로 온라인 측정하였다. 그리고 거칠기피치비의 효과를 조사할 때는 피토판을 사용하였으며 최대속도 지점들의 측정을 모두 이중피토판을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 완전히 발달된 영역에서의 난류유동특성을 조사한 것이며 완전히 발달된 영역은 길이방향에 대한 정적압력(static pressure)의 구배와 시간평균속도형상으로부터 알 수 있었다. Figs. 2와 3은 내관의벽에 거칠기구조가 $P/\epsilon = 2$ 를 갖는 동심환형관에서 직경비의 효과를 알기 위해 직경비가 0.26과 0.56인 경우 레이놀즈수(Re)가 21,000, 35,000, 그리고 54,000에 대한 시간평균속도형상들을 보여준다. 레이놀즈수들이 모두 난류영역에 속하기 때문에 레이놀즈수에 따라서 속도형상의 차이가 비교적 작으나 직경비에 대해서는 현저한 차이를 보인다. 이는 직경비가 될수록 채널간격이 좁아져 내관의벽에 설치된 거칠기의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 비교의 목적으로 양면 모두 매끈한 동심환형관 (concentric annulus)의 결과를 포함하였다. Fig.

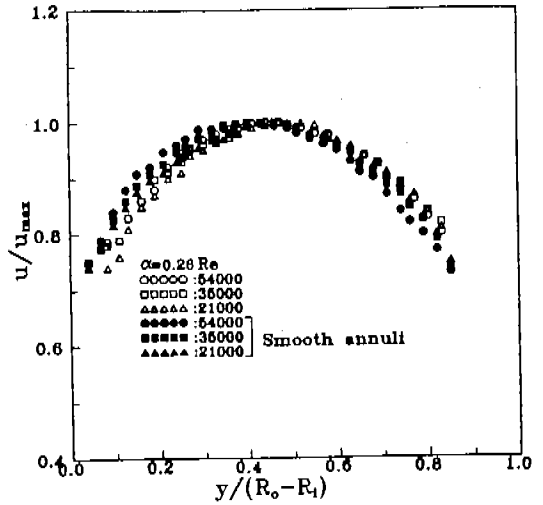


Fig. 2 Velocity profiles against Re at $\alpha = 0.26$.

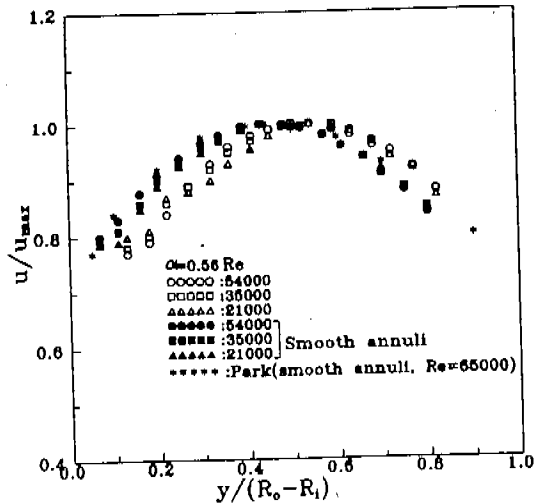


Fig. 3 Velocity profiles against Re at $\alpha = 0.56$.

3에서는 매끈한 경우의 Park⁽¹³⁾결과와 잘 일치한다. Fig. 4에서는 거칠기피치와 높이와의 비에 대한 효과를 조사하기 위해 직경비가 0.4에서 $P/\epsilon = 2, 4, 8$, 그리고 16에 대한 속도형상의 변화를 나타낸다. $P/\epsilon = 8$ 에서 가장 비대칭적인 형상을 보인다. $P/\epsilon = 8$ 인 거칠기가 유동장에 미치는 벽면마찰저항효과가 가장 큰을 나타내며, 이는 P/ϵ 는 7일 때 벽면마찰저항이 최대가 된다

는 Wilkie⁽⁷⁾의 결과와 유사하다. Figs. 2 - 4는 직경비보다 거칠기피치/높이가 유동장에 미치는 효과가 크다는 것을 입증한다. Fig. 5는 최대속도와 전단응력이 영(zero)인 지점들을 도시한다. 레이놀즈수가 증가할수록 두점들간의 차이가 커

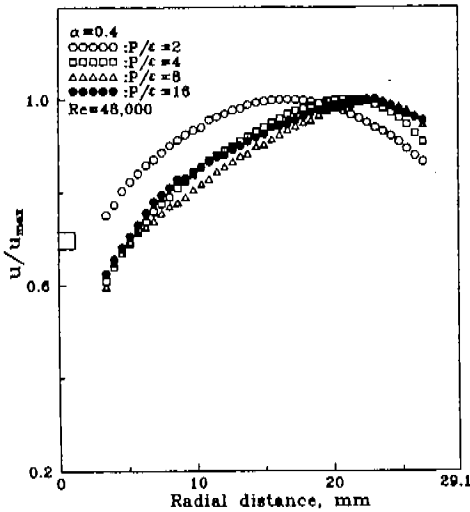


Fig. 4 Velocity profiles against roughness pitch ratio at $\alpha = 0.4$.

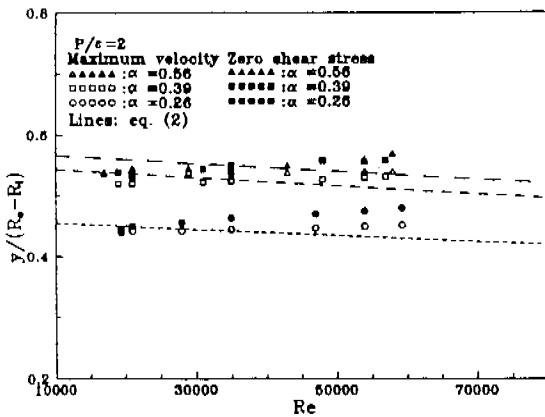


Fig. 5 Positions of maximum velocity and zero shear stress.

진다. 이는 평행평판에서 한측벽면에만 $P/\epsilon = 10$ 인 거칠기물 설치한 경우 레이놀즈수가 증가할수록 두점들간의 차이가 줄어드는 Hanjalic &

Lauder⁽¹⁴⁾의 결과와는 반대의 양상을 보이는데 이는 본 연구 모델인 환형관(annular tube)의 곡률효과 때문이라 사료된다. 그리고 전단응력이 영인 지점들이 최대속도지점보다 매끈한 벽측에 가까운 Fig. 5는 Hanjalic & Launder⁽¹⁴⁾의 값과 동일한 경향을 보였다. 최대속도와 전단응력이 0인 지점들이 비대칭적위치에 존재하는 것은 내벽측과 외벽측의 두 영역에서의 운동에너지(kinetic energy)와 유체요소크기(fluid element size)가 서로 다른 것에 의한 상호작용에 기인한다고 사료된다. 일반적으로 완전히 발달된 채널유동에서의 운동량 방정식은 식(1)으로 정의된다.

$$\tau = (\mu + \rho \epsilon_M) \frac{du}{dy} \tag{1}$$

그러나 최대속도지점($du/dy=0$)과 전단응력이 0인 지점($\tau=0$)사이에는 속도구배와 전단응력이 서로 반대부호를 가지므로 와점도(eddy viscosity)가 (-)로 되어 식(1)의 적용이 불가능하기 때문에 이러한 조건을 만족할 수 있는 모델의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 실험을 통해서 최대속도지점들에 대한 실험식을 아래와 같이 얻었다.

$$y_m = 0.299S(2.167 - 2.65 \times 10^{-6} Re)x(S/\epsilon)^{0.14} \times [-1.035(P/S)^2 + 1.21(P/S) + 0.508] \times (-4.61\alpha^2 + 4.61\alpha - 0.108) \tag{2}$$

실험식 Eq. (2)의 값들을 Fig. 5에 포함하였다. Figs. 6과 7은 $P/\epsilon = 2$ 에서 직경비가 0.26, 0.39 그리고 0.56에 대한 항력(Darcy form)마찰계수의 변화와 직경비가 0.4에서 $P/\epsilon = 2, 4, 8$, 그리고 16에 대한 마찰계수의 변화들 각각 나타낸다. 실험에 의한 마찰계수들은 아래의 식으로 정의하였다.

$$f = \frac{R_o f_o + R_i f_i}{R_o + R_i} \tag{3}$$

여기서

$$f_i = \frac{\tau_{wi}}{0.5 \rho u_b^2} \tag{4}$$

$$f_o = \frac{\tau_{wo}}{0.5\rho u_b^2} \quad (5)$$

식(4)와 (5)의 내벽과 외벽면의 전단응력 (τ_{wi} , τ_{wo}) 들는 축방향길이에 따른 정압기울기와 전단응력이 영(zero)인 지점의 축정으로부터 결정된다. 거친동심환형관에서 마찰계수의 예측식은 내관의 곡률(curvature)효과 때문에 벽법칙의 적용이 불가능하므로 실험자료에 의한 실험식에 전적으로 의존할 수밖에 없는 실정이다. 이러한 실정에서 Kakac et al.⁽¹⁵⁾은 양측모두 매끈한 동심환형관(concentric annulus)에 관한 항력(Darcy form)마찰계수 예측실험식을 아래와 같이 구하였다.

$$f_{sa} = \left[1.7372 \ln \left(\frac{Re}{1.964 \ln Re - 3.8215} \right) \right]^{-2} \quad (6)$$

$$\times \left(1 + 0.0925 \frac{1}{\alpha} \right)$$

$$5000 < Re < 10^7$$

본 연구에서는 식 (6)을 이용하여 내관의벽에 사각돌출형거칠기가 설치된 동심환형관에서 직경비, 거칠기피치/높이의 비, 레이놀즈수, 그리고 거칠기높이/내외관간의 간격의 비율을 복합적으로 고려한 경우의 항력(Darcy form)마찰계수의 실험식을 아래와 같이 구할 수 있었다.

$$f_{sa} = \left[1.7372 \ln \left(\frac{Re}{1.964 \ln Re - 3.8215} \right) \right]^{-2} \quad (7)$$

$$\times \left(1 + 0.0925 \frac{1}{\alpha} \right) e_r$$

$$10^4 < Re < 10^5$$

여기서

$$e_r = \left[-0.000124(S/\epsilon)^2 + 0.0068(S/\epsilon) + 0.9185 \right] \quad (8)$$

$$\times \left[117.68(P/S)^4 - 211.82(P/S)^3 + 116.83(P/S)^2 \right. \\ \left. - 18.43(P/S) + 2.0 \right] \left[0.3167\alpha^2 - 0.3597\alpha + 1.092 \right]$$

Fig. 6과 7의 마찰계수측정에서의 불확실성⁽¹⁶⁾은 Fig. 6에서는 최대 $\pm 8.4\%$ 이내, Fig. 7에서는 최대 $\pm 9.2\%$ 이내에 속하였다. 거칠기가 있는 동심환형관에서 마찰계수는 직경비보다 거칠기피치/높이의 비에 의해서 훨씬 많은 영향을 받는다는

것을 알 수 있다. Fig. 6에서 마찰계수는 매끈한 동심환형관의 결과⁽¹³⁾와 유사하게 직경비가 작을수록 증가한다. 이는 레이놀즈수의 정의물 시간평균속도, 동가직경, 그리고 동점도에 의해 나타났기 때문이라 판단된다. Fig. 7의 경우 마찰계수가 $P/\epsilon = 8$ 에서 가장 큰 것은 $P/\epsilon = 8$ 인 경우 거칠기에 의해 발생하는 난류유동의 재부착(reattachment)지점이 거칠기 간격과 거의 일치하고,⁽¹⁷⁾ 그러한 경우 거칠기에 의해 발생하는 난류에너지가 가장크기 때문이라 판단된다.

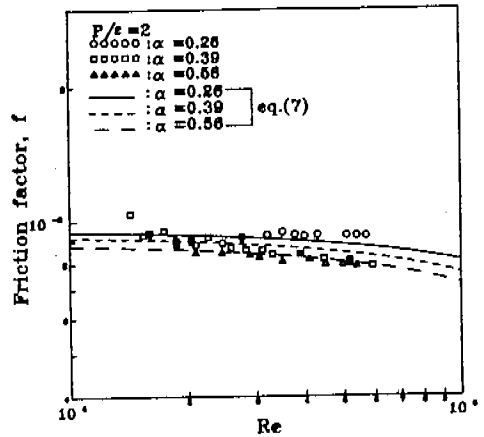


Fig. 6 Friction factor against radius ratio (α).

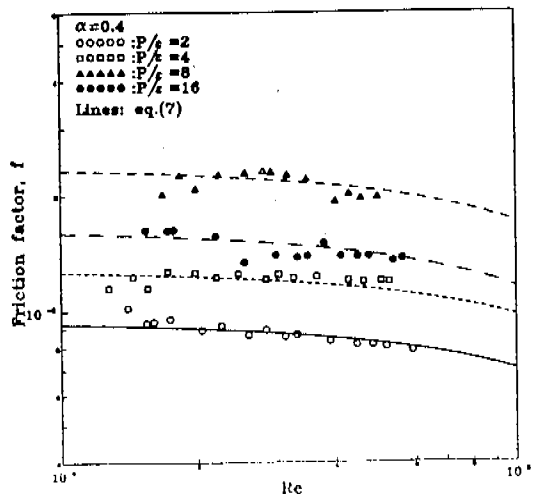


Fig. 7 Friction factor against roughness pitch ratio at $\alpha = 0.4$.

4. 결 론

(1) 내관에만 거칠기가 있는 동심환형관의 마찰계수를 구하는 데 수치해석은 이용하지 않고 마찰계수를 예측하는 실험식을 구할 수 있었다.

(2) 내관외벽에 만 거칠기가 있는 동심환형관에서 직경비보다 거칠기피치/높이의 비가 시간평균속도형상과 마찰계수에 더 많은 영향을 주었음을 입증하였다.

(3) 마찰계수의 값들은 직경비의 크기에 반비례하였고, 거칠기피치/높이에 대해서는 $P/\varepsilon = 8$ 에서 최대가 되었다.

참고문헌

- (1) Nikuradse, J., 1933, "Strömungsgesetze in Rauhen Rohren," *Forschg. Arb. Ing. Wes.*, No. 361.
- (2) Schlichting, H., 1936, "Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem," *Ing. Arch.*, Vol. 7, pp. 1~34.
- (3) Moody, L. F., 1944, "Friction Factor for Pipe Flow," *Trans. ASME*, Vol. 66, pp. 671-684.
- (4) Burggraf, F., 1970, "Experimental Heat Transfer and Pressure Drop with Two-Dimensional Turbulence Promoter Applied to Two Opposite Walls of a Square Tube," in: Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer, Bergles, E. E. and Webb, R. L., eds., ASME, New York, pp. 70~79.
- (5) Hong, Y. J. and Hsieh, S. S., 1993, "Heat Transfer and Friction Factor Measurements in Ducts With Staggered and In-Line Ribs," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 115, pp. 58~65.
- (6) Youn, B., Yuen, C. and Mills, A. F., 1994, "Friction Factor for Flow in Rectangular Ducts With One Side Rib-roughened," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp. 489~493.
- (7) Wilkie, D., 1966, "Forced Convection Heat Transfer from Surfaces Roughened by Transverse Ribs," *Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, Paper 1.
- (8) Lawn, C. J. and Hamlin, M. J., 1969, "Velocity Measurements in Roughened Annuli," Central Electricity Generating Board, Berkeley Nuclear Laboratories, RD/B/N1278.
- (9) Garimella, S. and Christensen, R. N., 1995, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Spirally Fluted Annuli: Part I - Hydrodynamics," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 54~60.
- (10) 김경천, 안수환, 정양범, 1995, "난류이중 동심관 유동에 미치는 표면거칠기 효과," 대한기계학회논문집, 제 19권, 제 7호, pp. 1749~1757.
- (11) 김경천, 안수환, 이병규, 1994, "외벽면에 거칠기가 있는 이중동심관유동의 난류구조," 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 9호, pp. 2443~2453.
- (12) 안수환, 김경천, 이윤표, 1994, "사각돌출형 거칠기가 있는 동심이중관내의 완전히 발달된 난류유동과 열전달," 대한기계학회논문집, 제 18권 4호, pp. 1072~1080.
- (13) Park, S. D., 1971, "Developing Turbulent Flow in Concentric Annuli: An Analytical and Experimental Studies," Ph. D. Thesis, Dpt. of Mech. Eng., University of Ottawa.
- (14) Hanjalic, K. and Launder, B. E., 1972, "Fully Developed Asymmetric Flow in a Plane Channel," *J. Fluid Mech.*, Vol. 51, Part 2, pp. 302~335.
- (15) Kakac, S., Shah, R. K., and Aung, W., 1987, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, Wiley, New York, pp. 3~92, 4-132.
- (16) Sang Joon Lee, 1993, Lecture Note of The AFERC Short Course(Experimental Thermo-Fluid Mechanics), Chap. 3 Uncertainty Analysis, AFERC, pp. 52~72.
- (17) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein R. J., 1971, "Heat Transfer and Friction in Tubes With Repeated-Rib Roughness," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601~617.