

# 채널유동에서 거친벽면이 열전달에 미치는효과

## Effects of Rough Surfaces on Heat Transfer in Channel Flow

안 수 환

S. W. Ahn

**Key Words** : Rectangular Duct(사각 덕트), Rib-Roughened Surface(돌출형 거칠기벽), Friction Factor(마찰계수), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Efficiency Index(효율지수)

**Abstract** : A comparison of fully developed heat transfer and friction factor characteristics has been made in rectangular ducts with one wall roughened by five different shapes. The effects of rib shape geometries and Reynolds number are examined. The rib height-to-duct hydraulic diameter, pitch-to-height ratio, and aspect ratio of channel width to height are fixed at  $e/D_e=0.0476$ ,  $P/e=8$ , and  $W/H=2.33$ , respectively. To understand the mechanisms of the heat transfer enhancements, the measurements of the friction factors are also conducted in the smooth and rough channels. The data indicate that the triangular type rib has a substantially higher efficiency index than any other ones in the range we studied.

### 1. 서 론

표면의 열전달을 향상시키기 위하여 표면 위를 인공적으로 모래입자나 거칠기구조로 만드는 방법은 잘 알려진 방법이다. 그러나 일반적으로 열전달을 향상시키면 유체유동의 저항도 동시에 증가된다. 많은 연구자들은 임의의 거칠기형상에 따른 유체유동의 거동을 정확히 예측하여 주어진 유체마찰에 대하여 최선의 열전달성능을 얻을 수 있는 형상을 구하고자 많은 연구를 행하여 왔다. 거친 원형파이프의 열전달은 1941년 Cope<sup>1)</sup>에 의하여 가장 먼저 취급되었고, 이차원적 거칠기 요소에 대해서는 1958년 Nunner<sup>2)</sup>가 심도 있게 연구하였다. 원자로분야에서 많이 사용되는 거친이중관에 관하여는 많은 연구자들에 의하여 수행되었다. 그 중에서 이중관에서 내관에만 거칠기가 설치된 연구는 Wilkie<sup>3)</sup>, White와 Wilkie<sup>4)</sup>, 그리고 Lee et al.<sup>5)</sup>, 외관에만 거칠기가 설치된 경우는 Ahn<sup>6)</sup>, 그리고 거칠기가 내외관에 설치된 위치에 따른 열전달과 마찰계수의 영향에 대한 연구는 Ahn and Kim<sup>7)</sup>에 의하여 행하여졌다. Wilkie<sup>3)</sup>는 피치비(P/e)비가 7과 8사이에서 Stanton수와 마찰계수가 가장 컸음을 밝혔고, White와 Wilkie<sup>4)</sup>는 거칠기 나선각이 열전달과 마찰

계수에 미치는 영향을 조사한 결과 P/e=8에서 나선각이 33° 일 때 가장 우수한 열전달 효율성능을 얻었다. 그러나 White 와 Wilkie<sup>4)</sup>의 연구결과는 유사한 거칠기형상과 유동조건에 관한 Webb et al<sup>8)</sup>의 측정과는 일치하지 않았다. Ahn and Kim<sup>7)</sup>은 이중관에서 거칠기 위치가 외관내벽에 설치되는 경우와 내관외벽에 설치되는 경우보다 열전달성능이 우수함을 보였다. 그리고 이중관에서 내관을 나선홈관(spirally fluted tube)으로 사용한 경우에 대해 Garimella와 Christensen<sup>9)</sup>가 취급하였다. Garimella와 Christensen<sup>9)</sup>의 연구는 물을 작동유체로 사용한 것으로 열전달계수를 수정대수온도차(LMTD)법에 의하여 구하고 그 자료를 바탕으로 마찰계수와 열전달에 관한 실험식을 얻었다. 사각덕트에 관한 연구로는 Hwang<sup>10)</sup>, Han et al.<sup>11)</sup>, 그리고 Hong<sup>12)</sup> 등이 행하였다. Hwang<sup>10)</sup>은 사각덕트중 바닥에 설치된 슬릿형 거칠기(slit rib)와 일체형 거칠기(solid rib)에 대한 비교연구를 하여 일체형보다 슬릿형의 경우가, 그리고 슬릿형 거칠기(slit rib)중에서도 슬릿형 거칠기의 기공율(void fraction)이 높을수록 열전달 성능이 우수함을 밝혔다. Han et al.<sup>11)</sup>은 사각덕트에서 거칠기를 바닥과 천장의 양면에 대칭적인 구조와 엇갈림(staggered) 구조에서 거칠기 피치비, 거칠기 높이비, 충돌각, 그리고 거칠기의 모양(shape)등 다양한 패러미터에 대하여 실험적 연구를 행하여 마찰계수와 열전달에 관한 실험식을 구하였

접수일 : 2001년 2월 16일

안수환 : 경상대학교 수송기계공학부, 해양산업연구소

다. 그리고 Hong<sup>12)</sup>은 Han et al.<sup>11)</sup>와 같이 양면에 거칠기를 설치하여 채널형상비(채널 폭/높이)와 거칠기가 대칭적 구조와 엇갈림 구조에 대한 실험적 연구를 통하여 채널형상비가 클수록, 그리고 대칭적 구조보다는 엇갈림 구조가 열전달 성능이 우수함을 보였다. Arman과 Rabas<sup>13)</sup>는 원관에서 거칠기모양을 사인(sine), 반원(semi-circle), 아크(arc) 그리고 사다리(trapezoid)형인 4가지 경우에 대하여 열전달 실험을 행하여 거칠기에 의한 열전달계수는 아크, 반원, 사인, 그리고 사다리형의 순서로 증가하였다. 이때 실험의 조건은 레이놀즈수가 9,400과 39,000이었고, 피치비는 10과 20이었다. 본 연구에서는 작동 유체가 공기이고 사각덕트에서 일정 열유속으로 가열된 바닥에만 거칠기를 설치하였으며 거칠기 피치비( $P/e$ )는 8이고 거칠기높이 대 등가직경( $e/D_e$ )의 비는 0.0476, 그리고 채널형상비(채널폭/높이)는 2.33으로 고정하였다. 실험의 주요 인자(main parameter)는 거칠기 모양(사각, 삼각, 원형, 등)이며 완전히 발달된 영역에서 바닥면의 중심선에서 구한 마찰계수와 열전달계수를 매끈한 경우와 비교하여 거칠기 효과를 효율지수로 나타내고자한다.

2. 실험장치 및 방법

측정은 개방회로흡입형 송풍채널에서 행하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. 송풍기(0.86 kW, 3400 RPM A/C motor)에 의해서 시험부로 공기가 유입된다. 측정범위는 채널의 등가직경으로 계산된 레이놀즈수로 10,000에서 70,000까지

이었다. 거칠기효과를 조사하기 위하여 사각돌출형 거칠기를 부착하지 않은 상태에서 먼저 실험을 하여 기준 값으로 하였다. 그리고 나서 Fig. 2의 Case 1에서 5의 경우에 대해 순차적으로 실험을 행하였다. 공기유량계와 마이크로 마노메터를 사용하여 속도분포를 측정하여 각각 공기유량을 구하였다. 전체의 채널길이는 3.6 m이고 그중에서 입구부분의 1.8 m는 가열하지 않고 뒷부분 1.8 m 길이부분에는 일정열유속으로 가열하였다. 가열히터는 woven heater (HTWC, OMEGA Co.)를 사용하였고 variac transformer로 전체 시험판(Al plate)에 일정 열유속을 공급하였다. 정상상태에 도달하는 시간은 최소한 40 분 이었다. 모든 측정조건에서 가열벽면과 평균온도(bulk temperature)의 차이는 35 °C 이내였다. 가열 알루미늄판은 5 mm(T) x 70 mm (W) x 1800 mm(L)이고 사각돌출형 거칠기설치는 2 mm x 2 mm 사각형 알루미늄을 고온전도성 접착제 (Omegabond 400, Omega Co.)로 접착시켰다. 시험부 채널의 폭은 70 mm이고 높이는 30 mm인 직사각형으로 하고 바닥은 알루미늄판이고 양옆은 두께 5 mm의 아크릴을 사용하였다. 채널시험부의 국부 유체속도와 정적압력의 측정은 전자식마이크로 마노메터(FCO-12)를 사용하였고 주기적으로 U자관 마노메터로 보정하였다. 알루미늄판과 사각돌출 거칠기(rib)는 충분히 연마하여 복사손실을 최소화하였고, 전도손실을 최소화하기 위해 10 mm 베이크라이트, 5 mm 공기간격(air gap), 15 mm 송판을 히터 밑에 설치하고, 시험부 양옆의 단열재외벽면과 밑의 송판외벽면의 온도를 측정하여 전도손실을 점

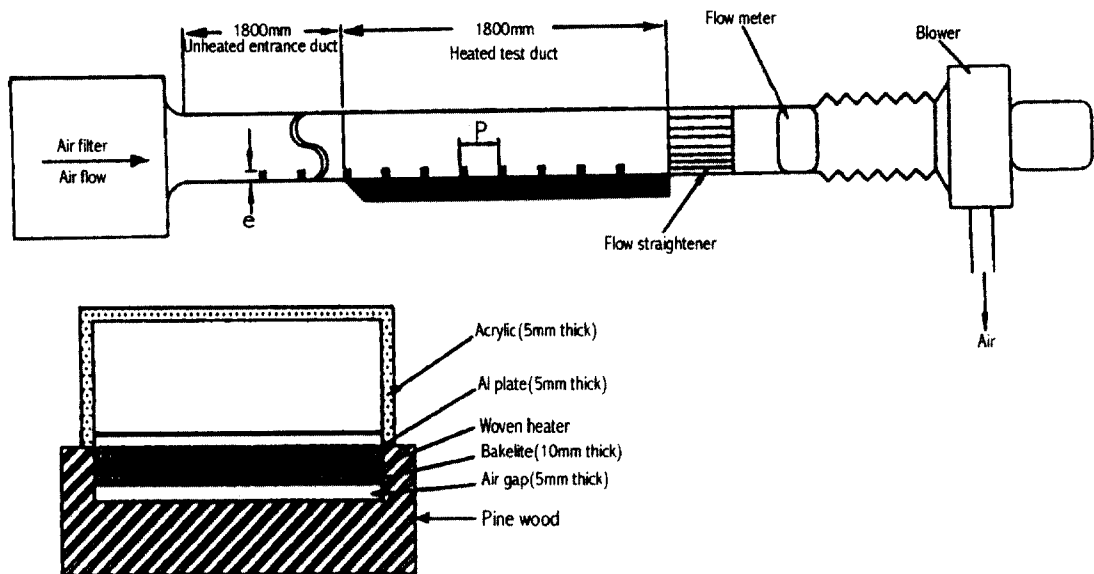


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

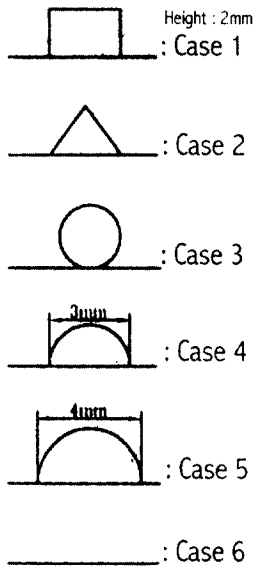


Fig. 2 Rib shape

검하였다. 온도측정은 자료획득장치 (DaqBooks, IOtech Inc.)를 이용하였고, 열전대는 0.3 mm $\phi$  T형(Omega Co.)을 사용하였다. 가열면적은 모든 경우에 대하여 매끈한 경우의 값으로 계산하였다. 공급전력은 수시로 전력계로 점검하였다. 가열벽면 (Al Plate)온도는 일정한 간격으로 18군데에 2.5 mm 깊이의 홈속에 열전대를 심고 열 에폭시 (thermal epoxy)로 고정하고 매끈하게 처리하였다. 시험부 중심선에서 높이에 따른 속도는 0.01 mm까지 측정이 가능한 이송장치를 사용하였다. 벽면온도의 편차는 모든 경우 45 $^{\circ}$ C기준에서  $\pm 1.8^{\circ}$ C이내 가 되었다. 시험부내의 국부온도측정의 편의를 위하여 윈도우를 설치하였다. 마찰계수는 유동채널길이에 따른 압력강하와 공기의 질량유량으로부터 아래의 식으로 정의하였다.

$$f = \Delta p / [4(L/De)(G^2/2\rho)] \quad (1)$$

그리고 열전달계수( $h$ )는 전력계로부터 측정된 공급전력( $Q$ )과 벽면( $T_w$ ) 및 평균온도( $T_b$ )로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$h = Q / [A(T_w - T_b)] \quad (2)$$

여기서 열전달 면적( $A$ )은 매끈한 바닥의 경우이다. 측정시 주위의 온도( $T_{air}$ )는 23 $^{\circ}$ C에서 25 $^{\circ}$ C이었다. 그리고 평균온도( $T_b$ )는 아래의 식에 의하여 측정하였다.

$$T_b = \frac{Q}{A_c u_b c_p \rho_{air}} + T_{air} \quad (3)$$

여기서  $A_c$ 는 채널단면적,  $u_b$ 는 평균유속이다. 식 (2)으로부터 얻어진 누셀트수( $Nu$ )는 아래와 같이 정의된다.

$$Nu = \frac{hDe}{k} \quad (4)$$

여기서  $k$ 는 작동유체의 열전도도이다. 불확실성 (uncertainty)은 Kline and McClintock<sup>14)</sup>가 제안한 방법을 사용하였으며 온도측정에서는  $\pm 1\%$ , 공급전력은  $\pm 3.2\%$ , 그리고 누셀트수( $Nu$ ), 레이놀즈수 ( $Re$ ), 마찰계수( $f$ )는 각각  $\pm 9\%$ ,  $\pm 6.5\%$ , 그리고  $\pm 8.5\%$  이었다.

### 3. 결과 및 검토

거칠기가 있는 사각덕트에 대한 실험을 하기전에 먼저 매끈한 사각덕트에 대한 마찰계수와 열전달 계수를 먼저 측정하였다. 레이놀즈수( $Re$ )는 등가지름과 디지털 마노미터로 측정된 평균유속으로부터 구하였다. Fig. 3은 완전히 발달된 영역에서 측정된 마찰계수로서 Fig. 2의 거칠기 형상의 효과를 나타낸다. 모든 경우 거칠기 피치비를 8, 채널높이에 대한 거칠기 높이비를 15, 그리고 채널폭과 높이의 형상비( $AR$ )를 2.33으로 하였다. 사각형 거칠기구조 (Case 1)의 마찰계수가 가장 컸다.

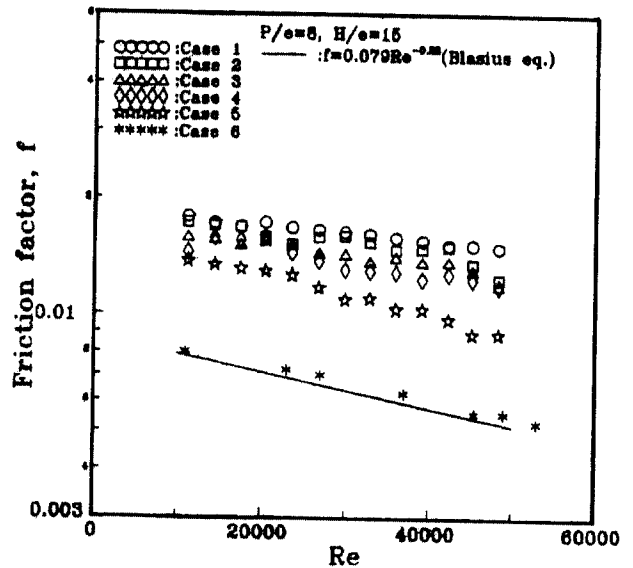


Fig. 3 Friction factor

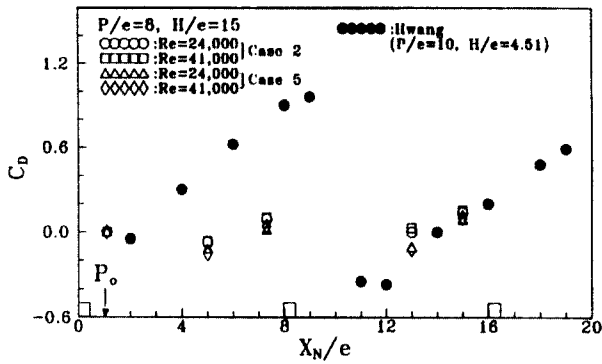


Fig. 4 Local drag coefficients

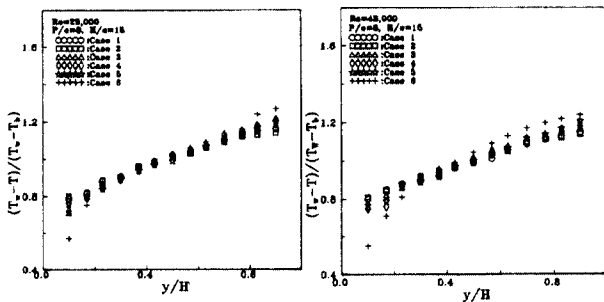


Fig. 5 Temperature distributions

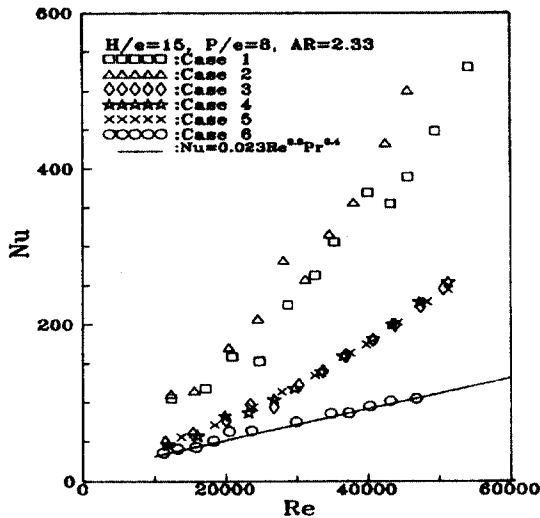


Fig. 6 Nusselt number

이는 벽면거칠기에서 발생하는 난류 혼합(mixing)이 클수록 축방향으로 작용하는 유체유동을 크게 방해하기 때문이라 판단된다. 거칠기효를 비교하기 위하여 매끈한 경우(Case 6)와 원관의 마찰계수 대한 Blasius실험식( $f=0.079Re^{-0.25}$ )을 포함하였다. Blasius값보다 Case 6의 결과와 거의 같았다. Fig. 4는 바닥중심선에서 거칠기(rib)주위의 국부항력계수(local drag coefficient)를 보여준

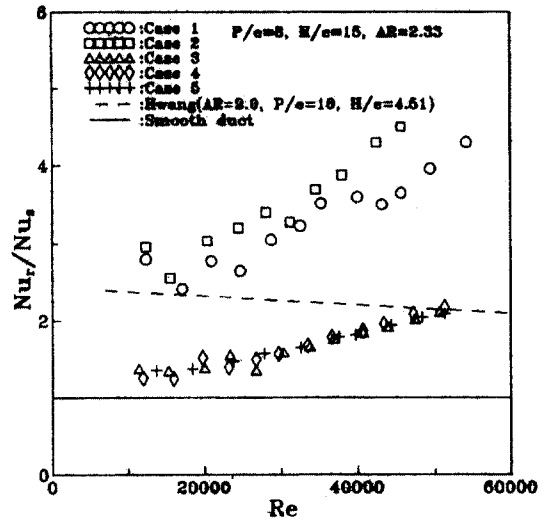


Fig. 7  $Nu_r/Nu_s$

다. 국부항력계수는 아래의 수식에 의하여 계산되었다.

$$C_D = (p_x - p_0) / (\rho u_b^2 / 2) \quad (5)$$

여기서  $p_0$ 는 기준압력값으로서 첫 번째 압력탭의 값이고,  $p_x$ 는 축방향위치의 정압(static wall pressure)이다. Case 2의 경우가 Case 5의 경우보다 전체적으로 국부항력계수가 높게 나타났고 레이놀즈수에 대한 변화는 거의 없었다. 이는 Case 2의 경우 반경방향으로 작용하는 유동성분이 크게 작용하기 때문이고, 본 연구범위의 레이놀즈수에서는 모두 충분히 발달된 난류영역에 속하기 때문이라 사료된다. 비교를 위하여 Hwang의 결과<sup>10)</sup>를 포함하였다. Hwang의 값<sup>10)</sup>은 본 연구보다 훨씬 크게 나타났는데 이는 거칠기 높이비가 크기 때문이라 판단된다. Fig. 5는 레이놀즈수가 29,000과 43,000에 대한 온도분포를 각각 보여준다. 모두 충분한 난류영역에 포함되기 때문에 유사한 양상을 보이고, 높이에 따른 온도변화는 삼각형 거칠기(Case 2)에서 가장 작았고 매끈한 경우(Case 6)가 가장 컸다. 이는 채널바닥에서 발생하는 대류열전달의 크기는 반경방향난류성분의 세기에 의해 가장 크게 작용하기 때문이라 판단된다. Fig. 6은 레이놀즈수에 대한 누셀트수( $Nu$ )의 변화를 나타낸다. Cases 1과 2는 Cases 3, 4, 그리고 5보다 훨씬 크게 나타났다. 이는 날카로운 사각(square)이나 삼각(triangular)형 구조가 둥근 모서리(edge)의 구조보다 대류열전달의 크기를 좌우하는 반경방향의 난류변동성분이 크게 발생하기 때문이라 사료된다. 비교를 위하여

Dittus와 Boelter<sup>15)</sup>의 실험식( $Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ )을 포함하였다. 이는 본 연구와 잘 일치하였다. 완전히 발달된 층류유동에서 매끈한 관의 형상들, 즉, 원(circle), 정삼각(equilateral triangle), 정사각(square), 형상비(shape ratio)가 2인 직사각(rectangle), 그리고 육각(hexagon)형 덕트에 따른 마찰계수와 열전달계수의 크기를 보면 정삼각, 정사각, 형상비가 2인 직사각의 단면(cross section)구조들은 원형관보다 마찰계수와 열전달이 적다<sup>16)</sup>. 그러나 완전히 발달된 난류에서는 형상비(shape ratio)가 2.33인 직사각형에 관한 본 연구와 정삼각형 덕트<sup>17)</sup> 그리고 정사각형 덕트<sup>12)</sup>에서는 원형관의 마찰계수와 열전달계수가 거의 일치하였다. 이는 유체분자의 성질에 의하여 마찰계수와 열전달계수가 결정되는 층류와는 달리 난류에서는 반경방향성분의 난류운동에너지와 유체요소(fluid element)의 크기에 의하여 열전달과 마찰계수가 좌우되기 때문이라 사료된다. 매끈한 관으로 무차원한 누셀트수( $Nu_r/Nu_s$ )를 Fig. 7에 나타내었다. 비교를 위하여 사각 거칠기의 Hwang<sup>10)</sup>의 결과(dashed line)를 포함하였다. 본 연구의 Case 1이 크게 나타났다. 이는 Hwang의 경우는 거칠기 높이가 너무 커서 거칠기 사이의 재순환유동과 외부유동간에 상호작용이 적게 작용하기 때문이라 사료된다. Fig. 8은 Webb et al.<sup>8)</sup>이 제안한 거칠기에 대한 효율지수를 나타낸다. 효율지수는 거칠기가 유익한 구조인지를 나타내며 아래의 식으로 정의하였다.

$$\eta = (Nu_r/Nu_s)/(f_r/f_s)^{1/3} \quad (6)$$

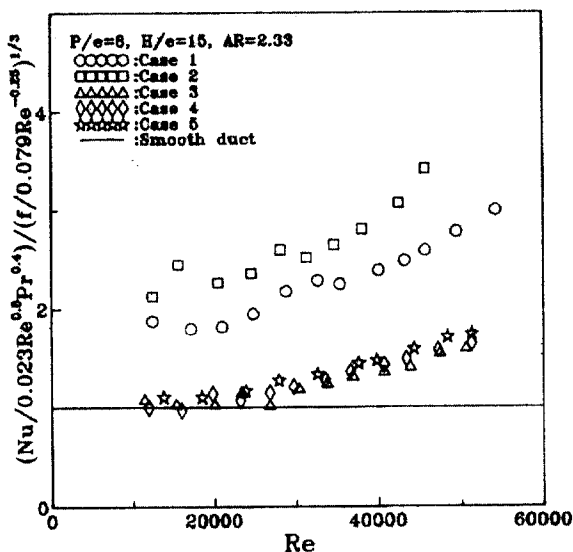


Fig. 8 Efficiency index

아래첨자  $r$ 과  $s$ 는 거칠고 매끈함을 나타낸다. 매끈한 경우 마찰계수는 Blasius 실험식, 누셀트수는 Dittus와 Boelter의 실험식을 각각 이용하였다. 실선은 매끈한 경우를 의미하며 모든 경우에서 매끈한 경우보다 대체로 높게 나타났다. 특히 삼각형 거칠기인 Case 2의 경우가 가장 높았다. 이는 본 연구에서 조사된 거칠기구조는 거의 모두 거칠기를 설치하는 것이 유익하다는 것을 보여준다.

#### 4. 결론

거칠기 피치비가 8이고 형상비는 2.33이며 거칠기 높이비는 15인 사각덕트에서 완전히 발달된 영역의 마찰계수와 열전달에 관한 실험적 연구로부터 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 국부항력계수는 Case 2의 경우가 Case 5보다 대체로 높게 나타났다.
- 2) 마찰계수는 사각형 거칠기구조에서 가장 컸고, 열전달계수에서는 삼각형 구조에서 가장 컸다.
- 3) 연구범위 중에서 모든 경우 거칠기를 설치하는 것이 유익하였음을 보였고 삼각형 거칠기 구조가 가장 유리하였다.

#### 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

#### 참고문헌

1. W. F. Cope, "The Friction Factor and Heat Transfer Coefficients of Rough Pipes", Proc. Inst. Mech. Engrs 145, pp. 99~105, 1941
2. W. Nunner, "Heat Transfer and Pressure Drop in Rough Tubes", AERE Lib/Trans. 786, 1958
3. D. Wilkie, "Forced Convection Heat Transfer from Surfaces Roughened by Transverse Ribs", Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf. Vol. 1, AIChE, NewYork, 1966
4. L. White and D. Wilkie, "The Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Some Multi-Start Ribbed Surfaces", in Augumentation of Convection Heat Transfer, Edited by A. E. Bergles and R. L. Webb. ASME, NewYork, 1970
5. Y. P. Lee, S. W. Ahn, and Y. Lee, "Turbulent

- Fluid Flow and Heat Transfer Induced by Square-Ribbed Surface Roughness in Concentric Annuli", Ninth Int. Heat Transfer Conf., 4-MC-20, Jerusalem, pp. 466~470, 1990
6. S. W. Ahn, "Prediction of Turbulent Heat Transfer in Concentric Annuli with Outer Rough Wall", Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 677~688, 2000
  7. S. W. Ahn, K. C. Kim, "Fully Developed Turbulent Flow and Heat Transfer in Rough Annuli", Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 4, pp. 501~510, 1998
  8. R. L. Webb, E. R. G. Eckert, and R. J. Goldstein, "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness", Int. J. Heat Mass Transfer", Vol. 14, pp. 601~617, 1971
  9. S. Garmella, and R. N. Christensen, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Spirally Fluted Annuli; Part II- Heat Transfer", J. of Heat Transfer, Vol. 117, pp. 61~68, 1995
  10. J. J. Hwang, "Heat Transfer-Friction Characteristics Comparison in Rectangular Ducts with Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall", J. Heat Transfer, Vol. 120, pp. 709~716, 1998
  11. J. C. Han., L. R. Glicksman, and W. M. Rohsenow, "An Investigation of Heat Transfer and Friction Factor for Rib-Roughened Surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1143~1156, 1978
  12. Y. J. Hong, and S. S. Hseih, "Heat Transfer and Friction Factor Measurements in Ducts with Staggered and In-Line Ribs", J. Heat Transfer, Vol. 115, pp. 58~65, 1993
  13. B. Arman, and T. J. Rabas, "Disruption Shape Effects on the Performance of Enhanced Tubes with the Separation and Reattachment Mechanism", ASME Symposium, Vol. HTD-202, ASME, NY, pp. 67~76, 1992
  14. S. J. Kline and F. A. McClintock, "Describing Uncertainties on Single Sample Experiments", Mechanical Engineering, Vol. 57, pp. 3~8, 1953
  15. F. W. Dittus and L. M. K. Boelter, University of California, Berkeley, Publications on Engineering, Vol. 2, pp. 443, 1930
  16. J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill Book Co., pp. 285~299, 1990
  17. H. J. Kang, T. T. Wong and C. W. Leung, "Enhanced Forced Convection in Triangular Ducts by Roughened Surface", Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 5, pp. 375~380, 1988