

테이프와 거칠기가 설치된 사각 채널의 압력강하 특성 Characteristics of Pressure Drops in Square Channels with Twisted Tape Inserts plus Axial Interrupted Ribs

안수환·배성택·강호근

S. W. Ahn, S. T. Bae and H. K. Kang

Key Words : Twisted Tape(테이프), Axial Interrupted Rib(길이방향 단절형 거칠기), Square Channel(사각채널), Pressure Drop(압력강하), Friction Factor(마찰계수)

Abstract : Pressure drops and friction factors in square channels with twisted tape inserts plus axial interrupted ribs are investigated. Tests are performed for Reynolds numbers ranging from 8,900 to 29,000. The rib height-to-channel hydraulic diameter, e/D_h , is kept at 0.057 and test section length-to-hydraulic diameter, L/D_h , is 30. The pressure drops and friction factor values are enhanced with axial interrupted ribs and twisted tape inserts. Square channels with twisted tape inserts plus axial interrupted ribs show the greatest pressure loss penalty in the present work. Friction factor data obtained for the square channel with twisted tape inserts plus axial interrupted ribs are less than those in the past publications for circular tubes with axial interrupted ribs and twisted tape inserts.

기호 및 설명

- AR : 채널 종횡비(W/H)
- B : 채널 바닥면
- D_h : 수력 직경, $4A_c/P_e$ [m]
- e : 거칠기 높이[m]
- f : 마찰계수
- H : 채널 시험부 높이
- L : 시험부 채널길이[m], 채널 좌측벽면
- ΔP : 시험부 압력강하[Pa]
- R : 채널 우측벽면
- T : 채널 상부벽면
- u_b : 체적 평균유속[m/s]
- W : 채널 시험부 폭
- ρ : 공기 밀도[kg/m³]

1. 서 론

열전달 촉진 기구로서 채널내 테이프와 거칠기를

설치하는 방법이 오랫동안 사용되고 있다. 채널내에 테이프를 삽입 및 제거하는 작업이 편리하기 때문에 열전달 촉진기구로서 테이프 삽입법은 열 산업 분야에서는 널리 사용되고 있다. 테이프 삽입법을 사용하는 분야는 고온가스 재생장치, 온수 가열기 그리고 열 교환기 등이 있다. 테이프 삽입에 의한 열전달 촉진의 크기는 테이프에 의한 복잡한 수직유동과 유동방해에 의한 유속증가에 따라 영향을 받는다. 한편으로 벽면에 거칠기를 설치하면 거칠기가 층류저층을 파괴하고 거칠기로부터의 유동 박리와 거칠기 사이에서의 유동의 재부착 때문에 벽면 근처에서 난류를 형성하게 되어 열전달을 향상시킨다.

많은 연구자^{1,2,3)}들이 테이프가 설치된 원형관에서 완전히 발달된 유동의 압력강하와 열전달특성에 대해 연구하였다. 이들 연구는 테이프를 삽입하면 큰 압력손실이 발생함과 동시에 열전달도 크게 향상되었음을 보였고, 테이프가 설치된 튜브에서의 열전달 계수와 압력강하는 튜브직경에 대한 테이프 꼬임 피치의 비와 레이놀즈 수에 영향을 받는다고 밝혔다.

튜브속에 삽입된 테이프(twisted tape)는 유동을 둘로 나누고 각 유동은 튜브 길이에 따라 나선형으로 된 반원형 튜브를 통해 흐른다. 나선회전형 반원형(spiral-rotated semi-circular) 튜브 속의 유동

접수일 : 2006년 5월 10일, 채택확정 : 2006년 10월 7일
안수환(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소
E-mail : swahn@gaechuk.gsnu.ac.kr Tel. 055-640-3125
배성택 : 경상대학교 대학원 기계시스템공학과
강호근 : 경상대학교 해양산업연구소

은 선회유동으로 인하여 압력강하와 열전달이 증가한다.

채널의 거칠기는 대류열전달을 향상시킨다는 사실은 잘 알려져 있다. Han⁴⁾과 Han et al.⁵⁾는 거칠기가 있는 사각채널의 열전달과 마찰계수 특성을 조사하였다. 그 결과 열전달과 압력강하의 증가는 거칠기 높이, 거칠기 간의 간격, 그리고 거칠기 충돌각의 크기에 의존한다는 결론을 내렸다. 테이프와 거칠기가 열전달에 미치는 연구로는 Zhang et al.³⁾이 행하였으며, 그들은 튜브 속에 테이프와 거칠기를 분리해서 설치하지 않고 동시에 설치한 경우의 열전달의 특성을 취급하였다.

위의 연구들로부터 앞으로 해결해야 할 분야는 다음과 같다; 즉, 채널에서 테이프 삽입과 거칠기에 관한 중전의 대부분 연구들은 원형관내의 유동에 대해 취급하였다. 그러나 현실적으로 터빈 블레이드 내부 냉각통로(passage)같은 특정분야에서는 원형튜브보다 사각채널구조가 더 많이 사용된다. 테이프를 사각채널 내에 설치하는 경우가 원형튜브 내에 설치하는 경우와 같은 열전달 성능을 발생하지는 미지수이다. 왜냐하면 테이프로 인하여 발생하는 선회 2차 유동은 사각채널과 원형튜브에서 서로 다른 유동 양상을 보이기 때문이라 사료된다. 그러므로 사각채널에서 테이프와 거칠기가 복합적으로 설치된 경우에 대한 열전달 성능의 연구가 요구된다. 본 연구자들⁶⁾은 테이프와 거칠기가 설치된 사각채널에서 가열조건에 따른 열전달특성을 조사한 바 있다.

본 연구의 목적은 사각채널에서 테이프와 거칠기가 마찰계수와 압력강하에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 실험의 단계는 (1) 매끈한 채널에서 테이프만 설치된 경우, (2) 테이프가 설치된 채널에서 바닥 면에만 거칠기가 있는 경우, (3) 테이프가 설치된 채널에서 바닥과 상부면에 거칠기가 있는 경우, 그리고 (4) 테이프가 설치된 채널에서 4면 전체 거칠기가 있는 경우로 하였다.

2. 실험장치

실험장치의 전체적 개략도는 Fig. 1과 같으며 실험장치는 송풍기, 유량조절용 밸브, 오리피스, 그리고 시험부(test section)로 이루어져 있다. 시험부 채널의 단면적(W×H)은 35 mm×35 mm로 종횡비(AR=W/H)가 1인 정사각형으로 제작되었고, 시험

부의 수력직경(D_h)은 35 mm이다. 정사각형 채널의 전체 길이는 2,700 mm이며, 실제 시험부의 길이는 900 mm로 제작하였으며, Fig. 1과 같이 시험부 입구부분에 시험부와 동일한 크기의 채널길이를 1,500 mm 뚫어서 시험부에서는 충분히 발달된 난류를 얻을 수 있다. 그리고 출구부분에도 300 mm를 별도로 설치하여 외부로부터의 유동간섭 영향을 최소화 하였다. 시험부는 거칠기와 테이프설치가 용이하도록 상부를 개방할 수 있게 제작하였다. 그리고 내부의 가열되지 않는 부분과 가열되는 부분은 유동변화를 최소화하기 위해 수평으로 제작하였다. 상부 판을 조립할 때 유체가 채널 내부에서 외부로 새어 나가거나 채널 외부의 유체가 혼입되는 것을 방지하기 위해 비교적 열에 강한 점성석고(gypsum)를 좌우측판과 상부 판이 접하는 부분의 틈에 바른 뒤 상부 판을 단단히 고정시켰다. Fig. 2는 사각채널에서 시험부 바닥에 거칠기(rib)와 가운데 테이프(tape)가 설치된 시험부의 모습이다. 거칠기(rib) 길이는 45 mm, 거칠기 사이의 길이방향 간격은 15 mm이며 횡 방향 간격도 15 mm로 하였고 거칠기들은 2줄로 평행하게 설치하였으며 거칠기 높이는 2 mm이다. 테이프는 길이가 900 mm이고 폭은 33 mm이며 두께는 0.1mm의 스테인레스 강판을 사용하였고 2.5번 꼬은 꼬임식 테이프(twisted tape)를 제작하였다. 테이프가 채널중앙에 놓이도록 4벽면과 테이프사이에 1 mm두께의 아크릴(acrylic)을 끼우고 벽면에 고온용 접착제로 아크릴(고온용)을 벽면에 고정하였으며 아크릴 면적은 최소화하였다. 그리고 테이프는 고온용 접착제로 아크릴에 고정시켰다.

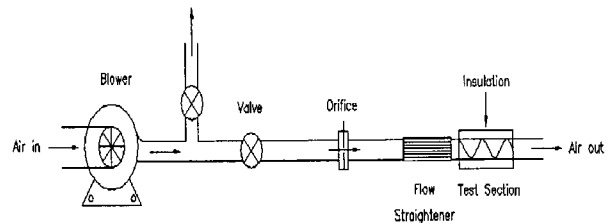


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

작동유체는 공기를 사용하였고, 송풍기로부터 공급되는 작동유체는 회전하는 송풍기 날개의 영향으로 발생하는 선회류(swirl flow)를 균질류 유체로 공급하기 위해 허니콤(honeycomb)을 설치하였다. 유체의 이송은 송풍기(195 W, 6 m³/min, AC motor)를 사용하였으며, 작동유체는 송풍기에 의해

흡입되어 허니콤(honeycomb), 입구에 가열되지 않는 부분, 시험부 순으로 지나 출구측 가열되지 않는 부분에서 대기로 배출되며, 송풍기에 설치된 유량조절장치(gate valve)로 시험부의 유속을 조절하여 얻고자 하는 레이놀즈 수를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용한 유속은 4 m/s ~ 13 m/s이며 이를 시험부의 수력직경을 기초로 한 레이놀즈 수로 표시하면 8,900 ~ 29,000범위이며, 오리피스 전후의 정압측정용 구멍에서 측정된 차압을 보정한 유속으로부터 레이놀즈 수를 구하였다. 유속과 차압측정은 정밀 차압계(Micro-manometer, FCO-12 Furness Control Ltd.)를 이용하였으며, 정밀 차압계의 측정범위는 $\pm 199.9 \text{ mmH}_2\text{O}$, $\pm 19.99 \text{ mmH}_2\text{O}$ 이며 각각의 측정오차는 $0.1 \text{ mmH}_2\text{O}$, $0.01 \text{ mmH}_2\text{O}$ 이다.

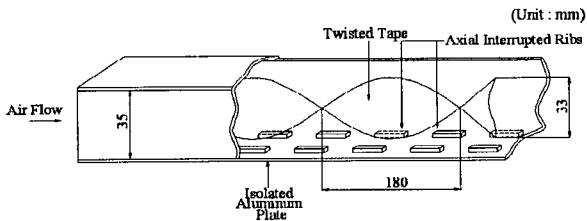


Fig. 2 An example of square channel with twisted tape insert plus axial interrupted ribs.

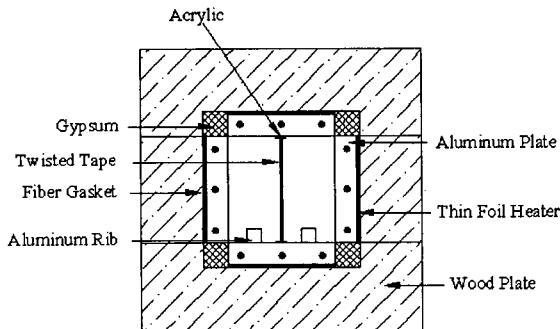


Fig. 3 Details of cross test section

Fig. 3은 시험부의 단면을 나타내고 있다. 시험부 외부는 단열성과 가공성을 고려하여 50 mm 두께의 목재를 사용하였다. 대체로 정상상태에 도달하는데 소요되는 시간은 30분 이상 되었다. 완전히 발달된 영역에서 채널평균마찰계수는 시험부 채널에서의 압력강하와 공기 질량유량으로부터 아래와 같이 정의하였다.

$$f = \frac{\Delta P}{4(L/D_h)(\rho u_b^2/2)} \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 시험부 입구와 출구간의 압력강하 (static pressure drop), L 는 시험부 채널길이, D_h 는 사각채널의 수력직경, u_b 는 체적 평균유속, 그리고 ρ 는 공기밀도이다. 평균마찰계수에서 최대불확실성⁽⁷⁾은 레이놀즈수가 8,900일 때 11%이었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 기준값을 구하기 위해 시험부에서 거칠기와 테이프가 설치되지 않은 매끈한 채널의 압력강하를 수두(water head)로 나타내고 있다. 속도보다 압력이 더 크게 변화였다. 이는 본 연구의 유동양상은 베르누이 법칙에 의존한다고 사료된다.

Fig. 5는 매끈한 채널에서 꼬임식 테이프 (twisted tape) 만 설치한 경우 완전히 발달된 영역의 시험부내 거리에 따른 정압변화를 보여준다. Fig. 4의 꼬임식 테이프를 설치하지 않은 매끈한 채널의 경우보다 정압의 크기가 훨씬 증가 되었다. 이는 꼬임식 테이프는 선회유동을 형성하고 이러한 선회유동은 유동저항을 크게 증가시키기 때문이라 사료된다. Fig. 6은 꼬임식 테이프와 길이방향의 단절형 거칠기를 바닥에 만 설치한 경우의 정압변화이다.

Figs. 4, 5 그리고 6을 볼 때 거칠기가 테이프보다 압력에 미치는 효과가 상대적으로 적음을 보여준다. 이는 본 연구의 경우 거칠기가 Fig. 2와 같이 사각 봉(square rod)구조의 길이 방향으로 배치되어 있어 채널전체 유체유동에 미치는 효과가 적기 때문이라 사료된다. 그림에서 정압(static pressure)의 값은 4벽면의 정압 값을 평균한 값이다.

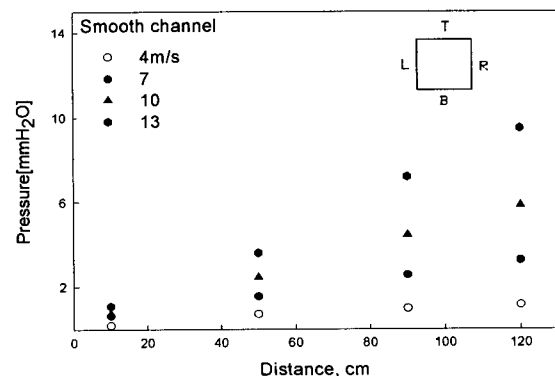


Fig. 4 Static pressure drop for smooth channel

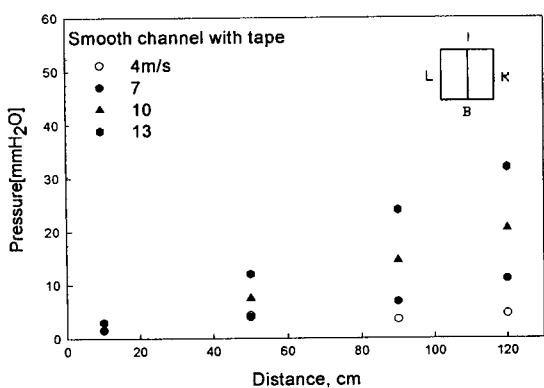


Fig. 5 Static pressure drop for smooth channel with twisted tape

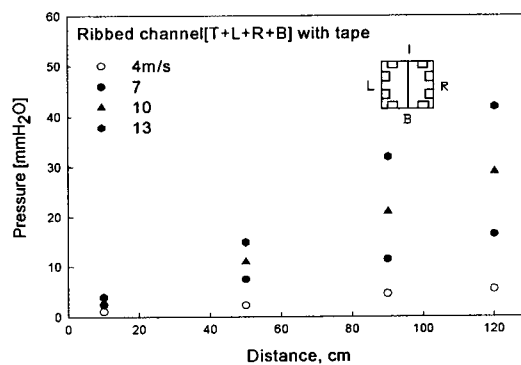


Fig. 8 Static pressure drop for smooth channel with twisted tape plus ribs [T+L+R+B]

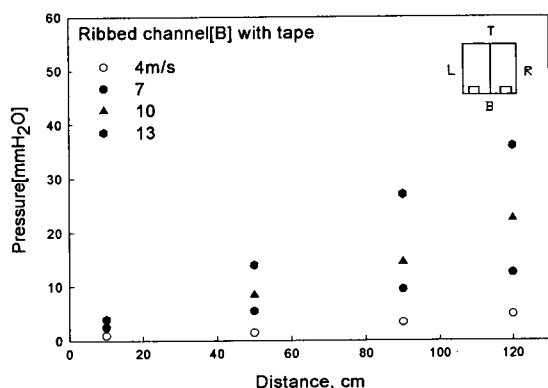


Fig. 6 Static pressure drop for smooth channel with twisted tape plus ribs [B]

Figs. 7과 8은 꼬임식 테이프가 설치된 사각채널에서 거칠기가 상하양면에 설치된 경우와 4면 모두 설치된 경우에 대해 각각 보여준다. 두 경우에서 압력강하의 변화는 큰 차이가 없음을 보여준다. 이는 Fig. 6에서 길이방향 거칠기의 효과와 같이 설명될 수 있다.

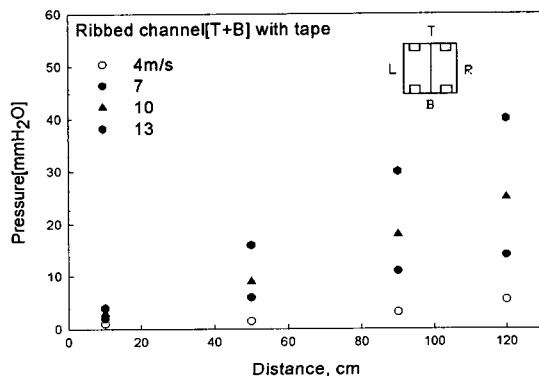


Fig. 7 Static pressure drop for smooth channel with twisted tape plus ribs [T+B]

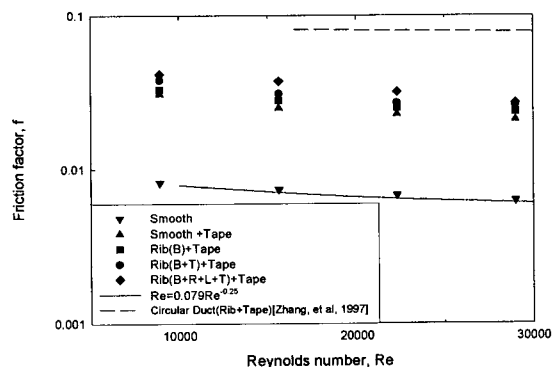


Fig. 9 Friction factor

Fig. 9는 앞의 그림들에서 구한 거리에 따른 정압값을 공식(1)에 대입하여 구한 마찰계수를 보여준다. 매끈한 채널의 마찰계수에 관한 상관관계식의 값들을 실선으로 포함하여 본 연구의 결과와 비교하였다. 앞의 정압변화의 그림에서와 같이 꼬임식 테이프가 길이방향 거칠기보다 마찰계수에 미치는 효과가 훨씬 컸다. 그리고 비교를 위해 매끈한 원형관에서 테이프를 설치한 경우³⁾도 포함하였다. 테이프가 설치된 원형관은 동일한 크기의 테이프가 설치된 사각채널보다 마찰계수가 훨씬 큼을 보여준다. 이러한 현상은 사각채널에서는 구석효과(corner effect)가 발생하기 때문이라 사료된다. 다시 말하면, 꼬임식 테이프와 거칠기가 있는 사각채널내의 유동장은 원형튜브내보다 채널내에는 2차유동이 발생하기 때문에 훨씬 복잡해지고 4구석에 유체유동이 유입되어 각 구석에서 와(vortices)를 형성한다. 이러한 현상으로 인하여 원형관보다 사각채널에서 압력강하가 적다고 사료된다.

테이프를 설치함으로써 압력강하가 크게 증가하므로 테이프의 사용은 제한적일 수 있으며, 터빈 냉각통로에 테이프를 설치함으로써 냉각성능이 더욱

악화 될 수 있기 때문에 터빈 블레이드 냉각장치 등의 설계 기술자는 테이프설치가 필요한곳인지를 판단한 후 적합한 테이프를 설치하여야 한다고 사료된다.

4. 결 론

레이놀즈수가 8,900에서 29,000인 범위에서 사각 채널내 꼬임식 테이프와 길이방향 거칠기를 설치한 경우의 압력강하와 마찰계수의 변화를 측정 한 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 매끈한 채널에서 꼬임식 테이프를 설치하지 않은 경우보다 꼬임식 테이프를 설치한 경우에서 정압 강하의 크기가 훨씬 증가 되었다. 이는 꼬임식 테이프는 선회유동을 형성하고 이러한 선회유동은 유동저항을 크게 증가시키기 때문이라 사료된다.
- 2) 거칠기가 테이프보다 압력에 미치는 효과가 훨씬 적었다. 이는 거칠기가 사각 봉(square rod) 구조의 길이 방향으로 배치되어 있어 채널전체 유체유동에 미치는 효과가 적기 때문이라 사료된다.
- 3) 테이프가 설치된 원형관은 동일한 크기의 테이프가 설치된 사각채널보다 마찰계수가 훨씬 컸다. 이는 사각채널에서는 구석효과(corner effect)가 발생하기 때문이라 사료된다.

후 기

이 논문은 첨단기계산업 기술혁신 인력사업 (NURI)의 지원에 의해 연구되었습

참고문헌

- 1) E. Smithberg and F. Landis, 1964, "Friction and Forced Convection Heat transfer Characteristics in Tubes with Twisted Tape Swirl Generators", ASME Journal of Heat Transfer, Feb., pp. 39-49.
- 2) R. F. Lopina and A. E. Bergles, 1967, "Heat Transfer and Pressure Drop in Tape Generated Swirl Flow", MIT, Dept. of Mechanical Engineering Report, No. DSR 70281-47.
- 3) Y. M. Zhang, J. C. Han and C. P. Lee, 1997,

"Enhanced Heat Transfer and Friction Characteristics of Turbulent Flow in Circular Tubes with Twisted Tape Inserts and Axial Interrupted Ribs", Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 4, No. 4, pp. 297-308.

- 4) J. C. Han, 1988, "Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Channels with Rib Turbulators", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 321-328.
- 5) J. C. Han and Y. M. Zhang, 1992, "High Performance Heat Transfer Ducts with Parallel Broken and V-shaped Broken Ribs", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, pp. 513-523.
- 6) 안수환, 김명호, 배성택, 강호근, "테이프가 있는 거칠 사각채널에서 가열벽면의 수가 열전달에 미치는 효과", 한국동력기계공학회지, 투고.
- 7) S. J. Kline and F. A. McClintock, 1953, "Describing Uncertainties on Single Sample Experiments, Mechanical Engineering", Vol. 57, pp. 3-8.