

다양한 전열관 내부 홈 변화에 의한 열전달 성능에 관한 연구

A Study on the Heat Transfer Performance Using Various Grooved Heat Transfer Tubes

한 규 일 · 정 원 규 · 예 석 수 · 박 성 현

K. I. Han, W. K. Chung, S. S. Ye and S. H. Park

Key Words : Single-phase(단상), Pressure Drop(압력강하), Working Fluid(작동유체), Grooved Angle(홈 각도), Heat Transfer Rate(열전달율)

Abstract : Single-phase heat transfer performance and pressure drop for internally grooved tubes with angles were studied. Experiments were carried out in a counter flow heat exchanger with water as a working fluid. Two commercially available internally grooved tubes and smooth tube were tested. The internal diameter of the smooth tube was 16.5mm and the internal diameters of grooved tubes were 15.4mm, 14.9mm, 15.0mm, 16.7mm, respectively. Grooved angles in the tubes were 37°, 43°, 45°, 50°, respectively. An experimental device to measure the friction factor and heat transfer coefficient was constructed. The experimental results were obtained for the fully developed turbulent flow of water in tube on the condition of uniform heat flux. As the increase of flow rate, Reynolds number, numbers of groove and grooved angle led to the increase of pressure drop. Also this paper showed that heat transfer rate increased with increasing numbers of groove and grooved angle. An empirical relation taken from this study represented most of the data within $\pm 25\%$.

1. 서 론

열전달 촉진에 관한 연구는 열교환기, 보일러, 냉동기 및 공기조화기, 폐열회수 등 광범위한 범위에서 다루어지고 있으며, 이러한 기기들의 소형화, 고성능화, 고효율화를 이루기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다¹⁾. 특히 고성능 열교환기에 관한 연구의 일환으로 열교환기 내부에 장착되는 전열관의 열효율 향상은 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구의 초점은 열교환기 내부에 장착된 전열관의 내부표면 형상변화 즉, 내부 홈(groove)의 개수 및 각도, 깊이 등의 변화에 의한 열전달의 특성 및 압력손실에 관한 것이며, 연구의 궁극적인 목표는 관 내부의 홈을 어떻게 만들었을 때 전열관 내부의 점성 마찰력이 감소되어 열전달의 향상뿐만 아니라 기계적 손실까지 최소화시킬 수

있는가에 대한 것이다.

현재의 연구들로서는 전열관의 전열면적을 넓히고 난류를 촉진시키기 위하여 관 내부에 특수 모양의 핀을 부착하거나 직각홈, 나선 홈 등의 형상을 관 내부 표면에 형상화함으로써 열전달을 증가시키고 있다. 이러한 내부 핀이나 전조기구를 이용한 난류 촉진장치에 의하여 열전달의 효율이 상당히 개선되고 있으나 상대적으로 관류 유동 저항이 증가함으로써 펌핑 소요 동력이 증가하게 된다^{2,5)}. 즉, 나선의 홈 깊이가 깊어질수록 열전달 유효면적은 증가하나, 압력손실이 크게 되므로 홈의 깊이의 최적 값은 압력손실과 유효면적의 관계를 고려하여 규명해야한다. 특히 강제순환식인 경우는 내부 표면 형상에 의하여 내부 유동 점성 마찰력이 크게 증가되어 큰 동력 손실을 가져온다. 열 교환기 등과 같이 관의 길이가 길게 되면 압력 강하가 크게 일어나 그 손실은 더욱 증가하게 된다. 그러나 많은 산업체에서는 전열관의 형상에 관한 전열특성, 유동특성, 압력손실 등에 관한 실험자료가 그다지 많지 않은 실정이다. 따라서 각종 기하학적 형상을 가진 전열관

접수일 : 1999년 1월 5일
한규일 : 부경대학교 제어기계공학과
정원규 : (주) 삼영열기
예석수, 박성현 : 부경대학교 대학원

의 제 특성을 이론적 및 실험적으로 규명하는 것이 절실히 요구된다.

튜브의 내부 홈에 의한 열전달 특성 및 압력 손실에 관한 연구동향을 살펴보면, 강제대류시의 열전달 효과를 향상시키기 위한 연구에서 Patankar⁶⁾는 이중 동심 원관에 직선형 핀을 설치하여 열전달계수와 마찰계수에 대하여 수치해석을 하였다. 인공 조도에 의한 열전달 촉진 및 압력손실에 관한 연구에서는 Webb⁷⁾이 작동유체의 유동방향과 직각으로 내부 홈을 가공한 전열관을 사용하였고, Manbach⁸⁾는 이중 동심 원관 내에서의 압력강하와 열전달 특성을 규명하였다. 그리고 Han⁹⁾은 평행 판에 성형된 단면이 직사각형인 홈에 대하여 해석하였다. 일반적으로 유동방향과 직각이 되게 홈이 가공된 전열관은 마찰로 인한 압력손실이 크기 때문에 이것의 완화책으로 나선형의 홈을 갖는 연구가 Manglik^{10,11)}, Withers^{12,13)}, 예¹⁴⁾ 등에 의하여 시작되었다.

튜브 내부의 홈의 형상에 관한 연구로는 Tsuchida¹⁵⁾, Chiang¹⁶⁾, Monta¹⁷⁾ 등의 연구 결과가 있지만 이들의 연구는 동관 내부유동이 과열영역에서 과냉액 유동을 모두 포함하는 관내 총열전달계수를 구하였으므로 튜브 내를 흐르는 액체의 단상유동의 결과와 비교하기 어려운 단점이 있다. 최근 동관 내의 유동영역을 과냉액과 이상유동영역으로 구분하여 열전달 및 압력강하 특성을 연구한 것으로서는 S. C. Ha¹⁸⁾, Khanpara¹⁹⁾, C. Y. Yang²⁰⁾의 연구 등이 있는데, 이들은 냉매의 관내 유동에 관한 연구를 수행하여 관내 나선형 홈의 단면에 대한 실험데이터를 제시하였으나, 관내 나선형 홈의 각도에 대한 실험결과는 얻지 못하였다. 또 실험데이터를 해석하는 과정에서 각 연구자들마다 다른 방법을 사용함으로써 데이터의 일관성에 문제가 있다. 내부에 마이크로 핀이 부착된 튜브를 사용한 많은 연구^{21,22)}가 실시되었으나 단상 열전달 mechanism을 설명하기 위한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다. 또한 관 내부에 거칠기가 있는 형상이 아닌 얇은 홈을 가진 튜브에 대한 Prandtl No.와 Nusselt No.의 연관성에 관한 연구는 거의 없으므로 Prandtl No.의 효과에 대한 연구도 매우 필요하다.

이상과 같이 현재까지의 대부분 연구는 열전달 효율의 증가 중심으로 많은 연구가 수행되어 왔다^{23,24)}. 그러나 앞으로는 관류 유동의 방향으로 난류 촉진장치를 설치하여 점성마찰력을 감소시키고 아울러 열전달 효율도 동시에 증가시킬 수 있는 장치의 연구 개발이 필요하다. 특히 제한된

공간 안에 긴 관을 가진 열 교환기를 설치해야 할 경우에 저 펌프 동력이 소요되는 전열관의 개발이 더욱 필요하므로 열 교환기에 사용되는 전열관의 유동 및 전열 효율 개선적 측면에서 새로운 내표면 형상에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 현재 기업체들이 전열관을 생산하는 추세에 병행하여, 전열관 내부에 골 또는 홈이 가공된 여러 형상의 수평 전열관을 전열관 직경과 규격별로 제작하였다. 그리고 열전달을 향상에 중요시된 실험 변수들을 기준으로 하여 열전달 실험을 실시하였으며, 열전달을 및 유동 특성, 그리고 압력손실, 열 유속 등에 대하여 실험 자료를 얻고 이론 식에 의한 값과 비교 분석하였다. 특히 깊이가 매우 얇은 내부 홈 형상 연구에 주력하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이며 실험장치는 보일러, 시험구간, 냉각수 유량계, 온수 유량계, 냉각수 순환회로, 온수 순환회로로 구성된다. 폐회로로 구성된 온수 순환회로에서 시험구간에 공급되는 가열수는 보일러에서 일정한 온도가 되도록 가열하여 펌프를 통해 시험구간의 환상공간(전열관의 외부)으로 공급하였으며, 냉각되어 보일러로 돌아온 물은 다시 정해진 온도로 가열되어 계속 공급되도록 하였다. 보일러는 항온조의 형태로써 일정한 온도로 온수가 공급되도록 설계되어 있다. 보일러 외부는 단열보온재로 포장하여 열의 외부방출을 차단하였다. 개회로로 구성된 냉각수회로에서의 냉각수는 3톤 용량의 물탱크를 사용하여 공급되며, 시험튜브 입구에서의 온도가 일정한 온도로 유지되도록 하였다. 실험중 냉각수로 사용되는 양에 비하여 물탱크의 용량이 매우 크기 때문에 각회의 테스트를 하는 동안 공급되는 냉각수의 온도는 계속 변하지 않았다. 냉각수의 유량을 일정하게 유지하기 위해서 유량 제어밸브를 사용하였다. 시험구간의 외부는 주위로의 열손실을 막기 위하여 50mm 두께의 단열보온재로 단단히 포장하였다. 환상공간에 연결된 온수 유입용 및 유출용 파이프라인도 열손실을 막기 위하여 단열재로 포장하였다.

Fig. 2는 시험구간의 상세도이다. 시험구간의 총 길이는 2000mm이고 내부직경은 28mm이다. 터보냉동기에 사용되고 있는 튜브의 길이는 대략 1000mm에서 3000mm이므로 본 연구에서는 중간

길이인 2000mm를 사용하였다. 보일러에서 가열된 온수는 펌프를 통하여 직경 28mm인 시험구간의 환상공간으로 흐르게 되어있다. 이때 튜브내부에는 냉각수가 향류로 유동하여 저온인 냉각수와 고온인 온수는 동 튜브사이에서 열교환을 하게된다. 미세한 온도의 변화를 정밀하고 신속하게 측정하기 위하여 실험장치 각 요소에 열전대를 설치하였다. 열전대는 동-콘스탄탄 열전대를 사용하였으며 동튜브의 외부표면에 폭 2mm, 깊이 1mm, 길이 30mm의 홈을 내어 열전대의 접점을 완전히 홈에 접촉시킨 후, 은납으로 완전히 채우고 24시간이 경과한 후에 외부교란을 방지하기 위하여 에폭시 수지로 덮었다.

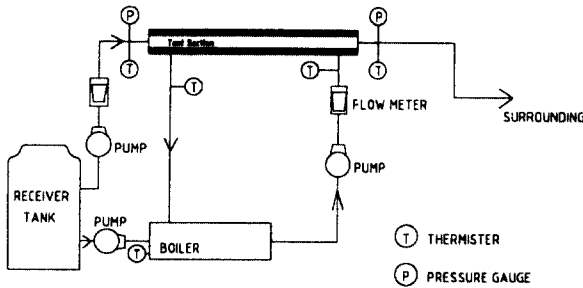


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

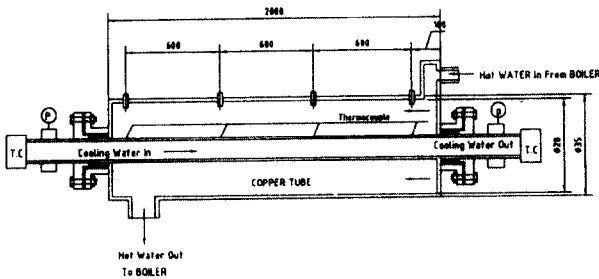


Fig. 2 Sectional view of test section.

실험을 통하여 획득되는 각각의 데이터들을 온도 측정장치, 유량 측정장치, 압력 측정장치로 측정된다. 냉각수와 온수 유량을 측정하기 위하여 직경이 25mm이며 측정 가능한 범위가 0.05~1.0 l/sec인 유리 테이퍼관 부유식 유량계와 직경이 20mm이며 측정 가능한 범위가 0.04~0.4 l/sec인 유리 테이퍼관 부유식 유량계를 각각 사용하였으며 압력의 측정은 냉각수 입구와 출구에 각각 0kg/cm²에서 2kg/cm²까지 측정이 가능한 브르돈식 압력계와 압력센서를 사용하였다.

실험의 재료인 전열관의 규격은 Table 1과 같다. 직경이 19mm이며 매끈한 튜브와 직경, 내부 홈, 나선의 각도, 그리고 홈의 수가 각각 다른 튜브들을 실험하였다.

Fig. 3은 내부홈의 각도를 나타낸다.

Table 1 Geometric specifications of tubes

단위 mm

	PLAIN TUBE	10 TUBE	20 TUBE	30 TUBE	40 TUBE
홈의 수	0	10	20	30	40
내부 직경	16.5	15.4	14.9	15	16.7
외부 직경	19	17.5	17.2	17.2	18.5
홈의 깊이	0	0.2	0.2	0.2	0.5
홈의 각도	-	37°	43°	45°	50°
튜브 길이	2000	2000	2000	2000	2000

α : 홈의 각도

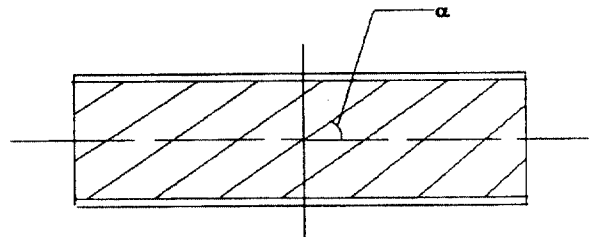


Fig. 3 Angle of groove

3. 결과 및 고찰

직경과 나선의 홈의 각도가 서로 다른 4개의 튜브와 매끈한 튜브에 대한 열전달 성능을 비교하기 위하여 실험이 이루어졌다.

Fig. 4는 매끈한 튜브와 내부에 나선의 홈이 있는 튜브의 열전달 계수값과 Re수를 비교한 것이다. 시험구간의 입구에서 냉각수의 온도는 27.5°C로 일정하게 유지시켰으며, Re수는 8000에서 70000범위에서 실험이 이루어졌다. 매끈한 튜브보다는 내부에 나선의 홈의 수가 증가하고 또한 나선의 각이 증가할수록 점점 열전달 계수가 증가함을 보여주고 있는데 그 이유는 나선홈의 증가에 의해 전열 표면적이 커지고 나선의 각이 증가

함에 따른 난류형성의 증가에 기인한 것으로 생각된다. 또한 Re수가 증가할수록 h값이 커지는 이유는 냉각수가 시험튜브내를 유동시 유속이 증가할수록 더 큰 와류가 형성됨에 기인한다.

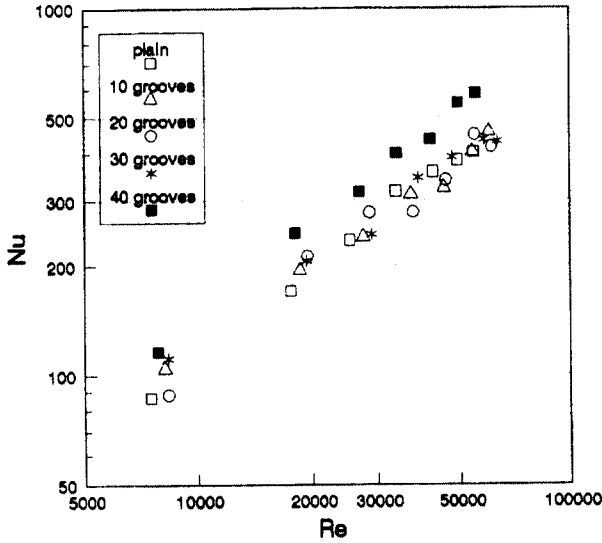


Fig. 4 Heat transfer coefficient vs. Reynolds number with test tubes.

Fig. 5는 각 튜브의 Re수에 대한 Nu수의 변화를 나타낸 것으로 평튜브, 각각 0.2mm의 홈의 깊이를 가지고 37°의 홈의 각도를 가진 10골의 튜브, 43°의 홈의 각도를 가진 20골의 튜브, 45°의 홈의 각도를 가진 30골의 튜브, 0.5mm의 홈의 깊이를 가지고 50°의 나선의 각을 가진 40골의 튜브의 순서대로 Nu수가 크게 나타난다. 즉 내부에 홈의 깊이, 홈의 수, 나선의 각이 각각 증가할수록 Nu수가 증가함을 보인다. 홈의 깊이가 0.2mm로 같은 10골, 20골, 30골의 튜브에 비해 홈의 깊이가 0.5mm인 튜브에서 큰 Nu수의 증가를 보이는 이유는 골수의 증가에 의해 전열면적이 증가되어 야기된 열전달 상승보다는 홈의 깊이를 증가시킴으로써 면적증가 효과와 함께 난류형성을 더욱 촉진시킨 경우가 더욱 열전달율을 상승시킨 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 홈의 각도가 37°에서 50° 사이로 각도의 변화가 큰 차이를 보이지 않는 튜브를 실험하였고 홈의 깊이도 두가지 종류로 제한되었다. 이는 제작상의 어려움과 한정된 예산에 기인하였다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 홈 깊이가 증가됨에 따라 Nu수가 많이 증가되는 것을 볼 때, 다양한 깊이와 다양한 각도를 가진 실험을 추가로 실시하여 와류현상 및 난류형성에 의한 열전달 촉진을 연구하기 위한 많은 실험이

필요하다고 사료된다.

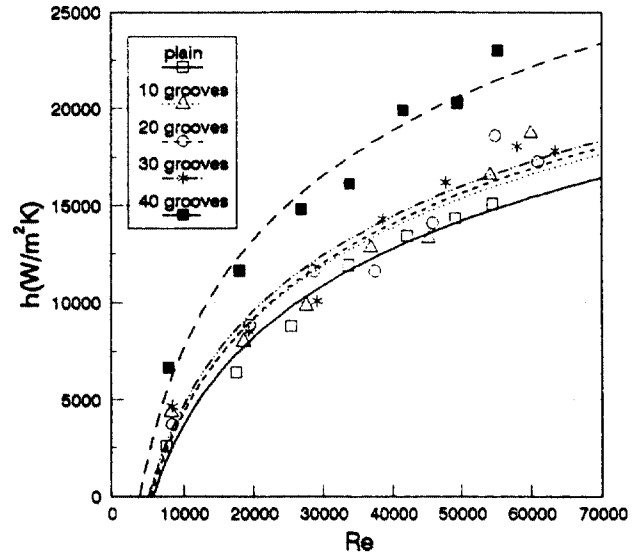


Fig. 5 Nusselt number vs. Reynolds number with test tubes

Fig. 6은 Re수와 평튜브에 대한 홈의 각도와 홈의 수를 증가시킨 각 튜브의 열전달 향상율(h/h_p)을 비교한 그림이다. 여기서 하첨자 p는 평튜브를 나타낸다. Re수가 증가함에 따라, 37°의 나선의 각도를 가진 20골의 튜브는 열전달율이 1.08~1.61배정도 증가하였고 43°의 나선의 각도를 가진 20골의 튜브는 1.08~1.45배정도 증가하였으며, 50°의 나선의 각을 가진 40골의 튜브는 1.4~2.35배정도 증가함을 보였다. Fig. 4에서 보여준 바와 같이 홈의 각도와 홈의 깊이가 가장 큰 40골 튜브가 난류증가에 의하여 열전달의 증가가 가장 현저하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 Re수와 평튜브에 대한 홈의 각도와 홈의 수를 증가시킨 각 튜브의 총합 열전달 향상율(U/U_p)을 비교한 그림이다. 여기서 U는 총합열전달계수로서 다음식에 의하여 구할 수 있다.

$$q = UA\Delta T_m \quad (1)$$

여기서 A는 열전달면적, ΔT_m 은 대수평균온도차를 나타내며 다음 식으로 표시된다.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \quad (2)$$

여기서 T_{h1} , T_{h2} 는 환상구간을 흐르는 물의 입

구온도와 출구온도, T_{c1} , T_{c2} 는 시험튜브 내부를 흐르는 냉각수의 출구온도와 입구온도를 각각 나타낸다. Re수가 증가함에 따라 37°의 나선의 각도와 10골의 내부 홈을 가진 튜브는 1.004~1.41배정도 증가하였고, 43°의 나선의 각도와 20골의 홈을 가진 튜브는 1.01~1.39배정도 증가비를 보인다. 그리고 45°의 나선 각도와 30골의 내부 홈을 가진 튜브는 1.08~1.6배정도 증가함을 보이며 50°의 나선 각도와 40골의 내부 홈을 가진 튜브는 1.09~1.8배정도 증가함을 알 수 있다.

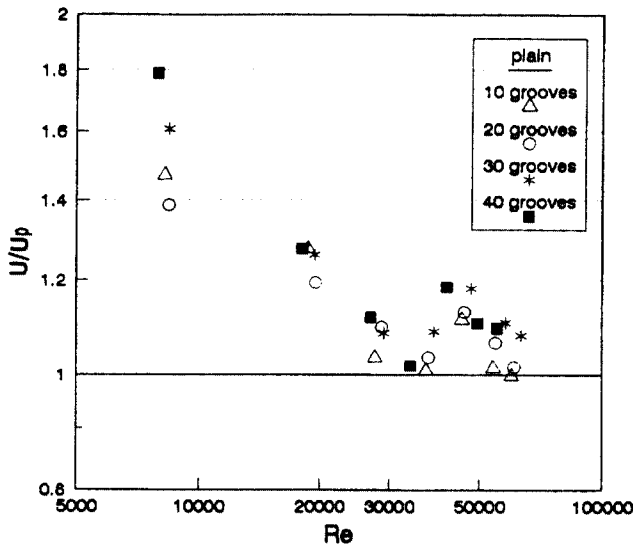


Fig. 6 Enhancement factor(heat transfer coefficient) vs. Re

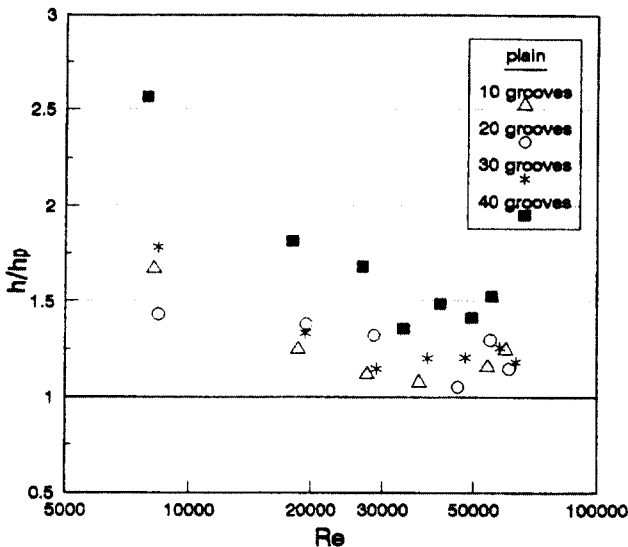


Fig. 7 Enhancement factor(overall heat transfer coefficient) with test tubes

Fig. 8은 Re수와 마찰계수의 관계를 나타내는 그림이다. 여기서 마찰계수는 다음 식으로 표현되는 Darcy의 마찰계수식을 이용하였다.

$$f = \frac{\Delta P D g_c}{\rho L \frac{u_m^2}{2}} \quad (3)$$

여기서 ΔP 는 압력차, D는 시험튜브의 내경, g_c 는 중력가속도, ρ 는 밀도, L은 튜브길이, u_m 은 냉각수의 평균속도를 나타낸다. 이 그림 또한 홈의 깊이가 같은 10골, 20골, 30골의 튜브는 마찰계수가 큰 차이를 보이지 않지만 홈의 깊이가 2.5배인 40골의 튜브는 마찰계수가 크게 증가함을 알 수 있다. 이것으로 압력강하는 골수의 증가보다는 홈깊이의 증가가 더 큰 요인으로 작용함을 알 수 있다.

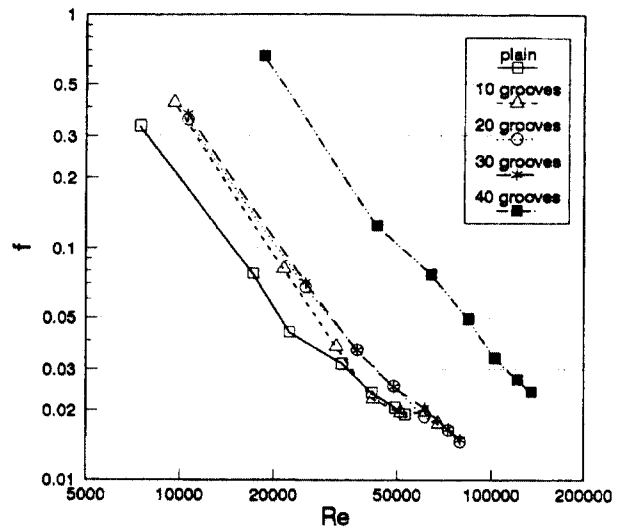


Fig. 8 Friction factor vs. Re

끝으로 본 실험에서 사용한 튜브의 열전달 데이터를 정리하여 다음과 같은 열전달 상관식을 구하였다.

$$Nu = 0.077 Re^{0.74} Pr^{0.4} \quad (4)$$

위의 식은 이전의 연구자인 Dittus & Boelter의 상관식보다 Re수의 지수가 다소 낮게 나타나고 상수는 다소 높게 나타나고 있다.

Fig. 9는 본 연구에서 제안된 위의 열전달 상관식과 Dittus-Boelter의 상관식을 비교한 것이다.

앞서 서술한대로 전반적으로는 Dittus-Boelter의 식과 비슷한 양상을 가지나 상대적으로 다소 높게 나타났다. 그 이유로서 본 연구에서 매끈한 튜브 외에 내부에 홈과 나선의 각이 형성된 튜브를 실험하였기 때문에 열전달율이 상승하여 Dittus-Boelter의 값과 다소 차이가 난 것으로 보여진다.

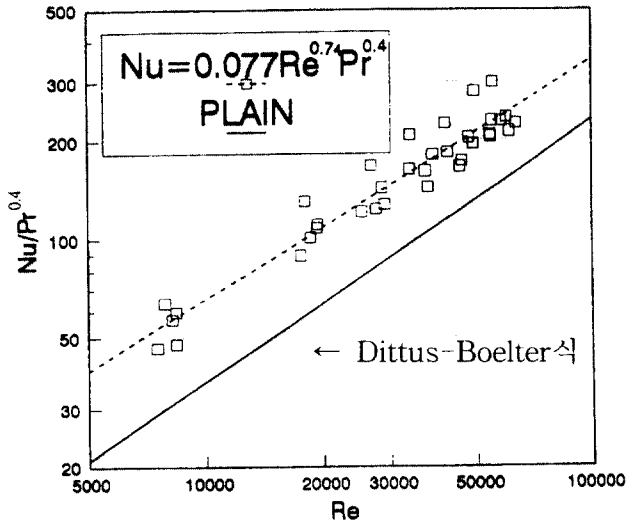


Fig. 9 Comparison of experimental data with the proposed correlation

튜브의 내표면에 나선형의 홈을 가공하게 되면 전열면적 증가와 유체의 난류유동에 의하여 열전달율은 상승하나, 이에 반하여 압력손실 또한 증가하게 되어 펌프동력 증가에 의한 기계적 손실이 발생한다. 따라서 홈에 의한 열전달율의 증가와 압력 손실을 서로 비교 분석하는 것이 필요하다.

본 연구 결과 고성능 전열관의 개발로 열전달율은 대단한 상승 효과를 볼 수 있었으나, 기계적 손실을 감안하면 전체효율이 다소 감소하게 되어 이에 따른 전열관 내부 나선홈 각도와 깊이, 피치 등의 최적치를 파악하는 것이 요구된다. 특히 굴수의 변화뿐만 아니라 홈각도 및 튜브의 실험을 통한 압력손실변화를 예측하는 것이 필요하다. 그러므로 더욱 많은 전열관 sample에 의한 많은 데이터가 요구되나, 여러 변수를 가진 실험튜브 제작에 한계가 있어 최적치 산출을 위한 다양한 실험이 조금 미비하였다. 앞으로 추가적인 실험이 요구된다 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서 튜브 내부에 다양한 나선형의 홈이 있는 튜브를 이용하여 열전달 및 압력강하 특

성 실험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 냉각수의 Re수가 증가함에 따라 튜브 내면이 매끈한 튜브보다는 나선의 홈이 있으며 또한 내부 홈 나선의 각이 형성된 튜브가 열전달과 압력강하가 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 전열관내부의 홈의 수와 나선의 각이 증가함에 따라 열전달과 압력강하가 증가하였다.
- 3) 같은 깊이를 가지는 튜브에서 홈의 수의 증가는 압력강하를 크게 증가시키지 않았으며 또한 열전달도 그다지 크게 증가시키지 않았다. 따라서 설계적인 관점에서 열전달 향상을 위해서는 홈의 수의 증가도 중요하지만 내부 홈의 깊이와 나선의 각의 변화에 중점을 두는 것이 바람직하다고 여겨진다.
- 4) 홈의 각도와 깊이가 가장 큰 40골의 튜브가 전열면적 증가와 홈각도와 깊이의 증가로 인한 난류형성 촉진에 의하여 가장 높은 열전달율을 보였으나, 압력강하는 가장 높은 것을 알 수 있었다.
- 5) 열전달 계수를 약 25% 정도의 오차 범위에서 예측할 수 있는 상관식을 수립하였으며 이는 다음과 같다.

$$Nu = 0.077 Re^{0.74} Pr^{0.4}$$

후 기

이 논문은 1998학년도 2학기 부경대학교 연구년 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Fujie, K., Itoh, N., Innami, T., Kimura, H., Nakayama, N. and Yanugidi, T., "Heat Transfer Pipe", U. S. Patent 4,044,797, assigned to Hitachi Ltd., 1977
2. Allan, W.K. and Sharma, V., "An Investigation of Low Turbulent Flows over Rough Surface", Jour. Mech. Eng. Sci., Vol. 16, pp. 71~78, 1974
3. Woodruff, D.W. and Westwater, J.W., "Stream Condensation of Various Gold Surfaces", Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 688~692, 1981
4. Rifert, V.G., Barabash, P.A., Golubev, A.B.,

- Leont'yev, G.G. and Chaplinsky, S.I., "Investigation of Film Condensation Enhanced by Surface Forces", Heat Transfer - Soviet Research, Vol. 9, No. 2, pp. 23~27, 1977
5. Schlichting, H., "Boundary-Layer Theory", 7th Edition, McGraw-Hill New-York, pp. 600~620, 1979
 6. Patankar, S.V., Ivanovic, M. and Sparrow, E.M., "Analysis of Turbulent Flow and Heat Transfer in Internally Finned Tubes and Annuli", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 29~37, 1979
 7. Webb, R.L., Eckert, E.R.G., "Application of Rough Surfaces to Heat Exchanger Design", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1647~1658, 1972
 8. Manbach, K., "Rough Annulus Pressure Drop Interpretation of Experiments and Recalculation for Square Ribs", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1143~1156, 1978
 9. Han, J.C., Glicksman, L. R. and Rohsenow, W. M., "An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib Roughened Surfaces", Int. J. Heat Transfer, Vol. 21, pp. 1143~1156, 1978
 10. Manglik, R. M. and Bergles, A. E., "A Correlation for Laminar Flow Enhanced Heat Transfer in Uniform Wall Temperature Circular Tubes with Twisted-Tape Inserts", ASME HTD-Vol. 68, pp. 19~25, 1987
 11. Manglik, R. M., "Heat Transfer Enhancement of Intube Flows in Process Heat Exchangers by Means of Twisted-Tape Inserts", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1991
 12. Withers, James G., "Tube-Side Heat Transfer and Pressure Drop for Tubes Having Helical Internal Ridging with Turbulent/Transitional Flow of Single-Phase Fluid. Part 1. Single-Helix Ridging", Heat Transfer Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 43~58, 1980
 13. Withers, James G., "Tube-Side Heat Transfer and Pressure Drop for Tubes Having Helical Internal Ridging with Turbulent/Transitional Flow of Single-Phase Fluid. Part 2. Single-Helix Ridging", Heat Transfer Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 43~58, 1980
 14. 예석수, 조동현, 한규일, 김시영, "수평 원형 전열관의 내외부 최적 핀 형상분포에 의한 비등 및 응축 열전달 촉진 연구(I)", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(II), pp. 191~195, 1993. 4
 15. Tsuchida, T., "Internal Heat Transfer Characteristics and Workability of Narrow 'Thermo Fin' Tubes", Hitachi Cable Review, No. 12, 1993
 16. Chiang, M., "Characteristics of Condensation Heat Transfer of Micro-Grooved Tube", Int'l Heat & Mass Transfer, 1993
 17. Monta, H., "Recent Improvements in Small Bore Inner Grooved Copper Tube", Int'l Tube Association Conference, 1990
 18. Ha, S.C., "Heat Transfer Characteristics of Horizontal In-Tube Evaporation", RPI, Ph.D. Dissertation, 1992
 19. Khanpara, J.C., "Augmentation of in Tube Evaporation and Condensation with Micro-Fin Tubes using Refrigerant R-113, Iowa Univ. Ph.D. Dissertation, 1986
 20. Yang, C.Y., "Condensation of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro Fins", Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State Univ. Mechanical Engineering Dept., 1994
 21. Webb, R.L., Eckert, E.R.G. and Goldstein, R.J., "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness", Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 14, pp. 601~617, 1971
 22. Chamra, L.M. and Webb, R.L., "Condensation and Evaporation in Micro-fin Tubes at Equal Saturation Temperatures", Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 2, No. 3, 1995
 23. 한규일, 조동현, "수평 원형 전열관의 핀 효과에 의한 응축 및 비등 열전달 촉진에 관한 연구(I)", 대한기계학회 논문집, 제18권 제5호, pp. 1264~1274, 1994
 24. 한규일, 조동현, "수평 원형 전열관의 핀 효과에 의한 응축 및 비등 열전달 촉진에 관한 연구(II)", 대한기계학회 논문집, 제18권 제5호, pp. 1275~1287, 1994