

차량용 열교환기 사각관 내부 흐름에서 압력강하 및 열전달 특성

강희찬* · 전길웅** · 김광일***

Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Internal Flow of the Rectangular Tube for Automobile Heat Exchanger

Hie Chan Kang*, Gil Woong Jun** and Kwang Il Kim***

Keywords : Pressure drop(압력강하), Heat transfer(열전달), Heat exchanger(열교환기), Internal flow(내부유동), Raectangular tube(사각관), Transition(천이), Scale-up experiment(상사실험)

Abstract

The present work was performed to investigate the thermal and hydraulic characteristics of flow inside the plain and turbulator flat tubes for the automobile application. The pressure drop and heat transfer coefficient at laminar, transition and turbulent regimes were studied experimentally and numerically. The flow transition was confirmed by flow visualization and quantitative data. It is proposed equations for the friction and heat transfer coefficient in the fully developed laminar flow inside rectangular tube as function of aspect ratio.

1. 서론

차량 및 산업용 열교환기에서 압력강하 감소와 열전달 촉진을 위하여 Fig. 1과 같은 루우버 형 사각관 열교환기를 널리 사용하고 있다. 대표적인 대상이 자동차 라디에이터이며 사각관의 형상은 성능은 물론 중량, 생산성, 운전 안정성에 중요하다.^[1]

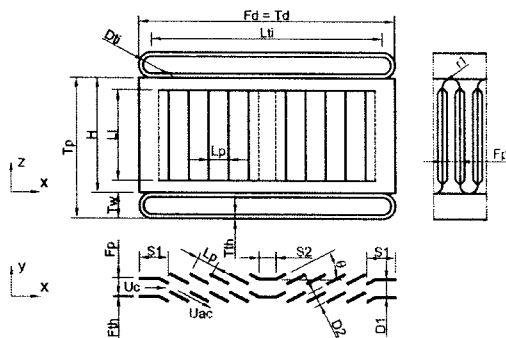


Fig. 1. Dimensions of automobile heat exchanger.

압력강하는 줄이고 전열성능은 향상시키기 위하여 루우버 형 사각관 브레이징 열교환기에 대한 여러 연구가 수행되었다. 루우버 형 측에 많은 연구가 수행되었다. 대표적으로 Davenport^[2], Webb and Trauger^[3], Sahnoun and Webb^[4]는 루우버 형 측의 열유동 성능을 예측하는 연구를 하였다. Kanjino and Hiramatsu^[5]은 루우버 사이의 유동에 대한 가시화 실험을 수행

하여 이후 연구자들이 루우버 형의 열유동 특성을 이해하는데 기여하였다. 관 내부 유동에 대하여 상당히 많은 연구가 수행되었으며 Kays and Crawford^[6]는 연구 결과를 정리하였다. 특히 매끈한 표면에서 완전 층류 및 난류 영역에서의 특성에 대한 자료는 풍부하다. 그러나 차량용 열교환기는 공기측 압력강하 감소, 전열성능 향상, 생산성 향상 및 경량화를 위하여 비원형의 사각한 관을 사용하고 있다. 사각관의 단면은 대부분 직사각형에 가깝다. 열전달 촉진을 위하여 흐름방향 또는 흐름 단면 방향으로 돌기가 설치되어 있다. 관 내부에는 수력 직경 기준 Re수가 100 이상 10000 수준까지 넓다. 따라서 차량에 사용하는 특수한 형상의 전체 내부 유동에 대한 정밀한 자료는 찾기가 어렵다. 특히 차량용 열교환기는 목적에 따라 층류, 난류 및 천이 영역에 걸쳐 넓은 범위에서 사용하고 있어 실제 경우에 대한 세밀한 연구와 검토가 필요하다.

본 연구에서는 내부 형상이 차량용 사각관의 압력강하 및 열전달 특성에 대하여 실험 및 수치적으로 연구하였다. 층류, 천이, 난류 영역에 대하여 3차원 수치해석과 확대모형 실험을 수행하였다. 층류영역에서 중형비에 따른 압력강하 및 열전달 상관식을 제시하였다. 열유동 특성은 기존의 이론과 비교하고 고찰하였다.

2. 실험 및 수치해석 방법

표면이 불규칙한 비원형관에 대한 천이현상을 예측하기는 쉽지 않다. 실험자료 없이 유동특성을 예측하여 수치계산 모델을 적용하는 것도 어렵다.

본 연구에서는 차량용 열교환기의 관내 유동에서 사각-평활 관에 대한 기존 이론 타당성 확인, 사각관 내부 터블레이터(turbulator) 표면인 경우 임계 Re수 확인, 관 마찰계수의 측정, 수치계산 결과의 타당성 검토를 목적으로 실험장치를 구성하고 실험을 수행하였다.

* 군산대학교 기계공학부, hckang@kunsan.ac.kr
** HCC, gwjeon@e-hcc.com
*** HCC, kikim@e-hcc.com

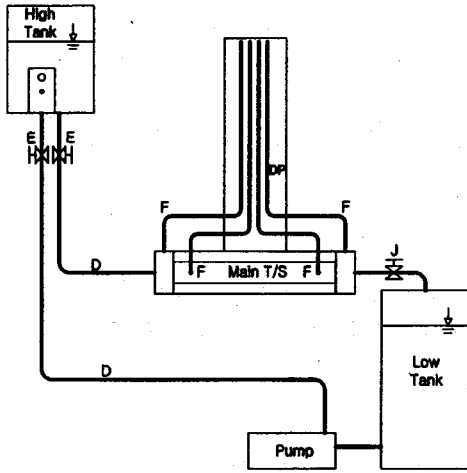


Fig. 2. Schematic diagram to investigate the hydraulic characteristics in the rectangular tube used in the present work.

실험 개념은 강희찬과 김무환[7, 8]이 제시한 모형실험기법을 이용하였다. 확대모형을 이용한 압력강하 실험장치는 Fig. 2와 같다. 실험장치는 사각관 내부에 냉각수의 압력강하와 유동 특성을 가시화 할 수 있도록 제작하였다. 실험장치는 주실험부, 고수조, 저수조, 펌프, 유동가시화 장치로 구성된다. 실험장치에서 물의 유량은 0.2 l/min - 8.5 l/min 이며 전체 수두차는 800 mm 이다. 고수조와 저수조는 일정한 수두와 유량을 유지하기 위한 것으로 용량은 각각 30 l과 40 l 이다. 냉각수는 고수조, 주실험부, 저수조, 펌프 그리고 고수조로 순환된다. 주실험부는 가시화가 가능하도록 투명한 폴리카보네이트로 제작하였다. 주실험부의 입구와 출구에는 정채실을 두어 입구 및 출구손실도 같이 고려할 수 있도록 하였다. 염료는 주실험부의 입구 정채실에서 투입하여 유동의 변화를 측정하였다.

시험 대상은 평활 관, 터블레이터 관(터블레이터 in-line 배열 및 staggered 배열)으로 3가지 이다. 평활 관에서 냉각수 유로의 규격은 폭 61.8 mm, 길이 462 mm, 높이 2.4 mm 이다. 터블레이터 관은 폭 58.5 mm, 길이 435 mm, 높이 4.5 mm 이다. 터블레이터 관에서 터블레이터의 흐름방향 피치는 12.0 mm 너비방향 피치는 9.0 mm 이다. 터블레이터는 흐름방향으로 4열이 설치되어 있다.

물의 유량은 출구에서 일정시간 동안 받은 물의 양의 질량을 재는 방법으로 하였다. 질량유량의 측정오차는 1.3% 이내이다. 압력강하는 U관 액주계로 측정하였다. 측정 정밀도는 5 Pa 이내이며 정상상태 확인 후 3회 측정하여 평균 값을 취하였다. 압력측정 위치는 입구 및 출구의 정채실 및 주실험부 내부의 2개소 등 총 4개 소이다. 주실험부의 사각관에서 압력강하 측정을 위한 정압공 사이의 거리는 모두 365 mm 이다. 측정된 압력강하 ΔP_w 로부터 압력강하계수 f_w 는 다음과 같이 구하였다.

$$\Delta P_w = f_w \frac{L}{D_h} \frac{G_w^2}{2\rho_w} \quad (1)$$

여기서 L 과 D_h 는 사각관의 길이와 수력직경 이다.

유동의 층류에서 난류로 천이하는 과정을 가시화 하기 위하여 주실험부 입구의 정채실에 4색 잉크 주입장치를 두었다. 잉크 주입에 의한 교란을 줄이기 위하여 작은 수위 차에서 중

력으로 유입되도록 하였다. 유입량은 밸브로 조절하였다.

수치계산은 Fluent 이용하여 수행하였다. 기하학적 형상은 주실험부와 동일하게 하였다. 해석모델은 층류영역 인 경우 층류모델을 난류영역 인 경우에는 저 Reynolds수 모델을 사용하였다. 입구 유동조건은 일정온도 균일유동 출구에서는 출구조건을 적용하였다. 사용한 격자는 약 200만개 이며 수렴조건은 압력과 에너지 잔류항의 합이 10^{-6} 이하 인 조건으로 하였다.

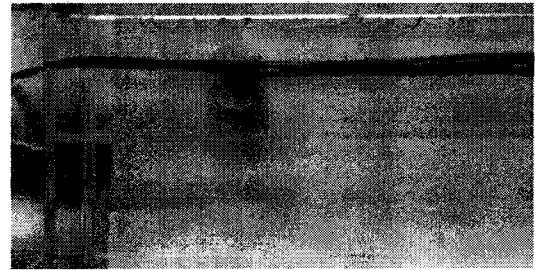


Fig. 3(a). Flow visualization for the plain tube, $Re_{Dh} = 700$, laminar flow.



Fig. 3(b). Flow visualization for the turbulator tube, $Re_{Dh} = 2,900$, turbulent flow.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동가시화

Fig. 3(a, b)는 주실험부에서 유동가시화 실험 사진이다. Fig. 3(a)와 같이 Re 수가 700에서 평활 사각관(plain tube)의 입구에서 투입한 염료는 흐름방향으로 잘 섞이지 않았다. 물을 유량을 증가시켜 Re 수를 2,200으로 증가시킨 경우 염료는 혼합되었다. 사각 관에 터블레이터가 설치된 경우 Re 수가 700 이하에서 입구에서 투입된 염료는 거의 섞이지 않았다. Fig. 3(b)는 터블레이터 사각 관에서 Re 수가 2,900으로 매우 큰 경우 염료는 왕성하게 혼합되는 것이 관찰되었다.

3.2 압력강하 및 열전달계수

차량에서는 냉각수 및 냉매의 유로로 납작관을 많이 사용한다. 납작관의 단면은 사각형의 근사하다. 이전 여러 연구자의 연구에서 층류 완전발달유동에 대한 관 마찰계수와 열전달계수는 사각 단면의 종횡비(Ar)의 함수이다. Mills[9]의 자료를 참고하여 작성한 종횡비와 관 마찰계수와 벽온도 일정 조건의 열전달계수에 대한 상관식의 계수는 Fig. 4와 같다. 본 연구에서는 비원형관에 대한 자료를 정리하여 관 마찰계수와 열전달계수에 대한 종횡비의 영향을 다음 식으로 정리하였다.

$$f_w Re_{Dh} = \exp(1.982 - 0.222e^{-1.62(\log Ar)^2}) \quad (2)$$

$$Nu_{Dh} = \exp(0.877 - 0.389e^{-1.41(\log Ar)^2}) \quad (3)$$

위 식은 단면이 사각형, 층류, 완전발달, 평평한 표면에 대하여 사용하기를 추천한다.

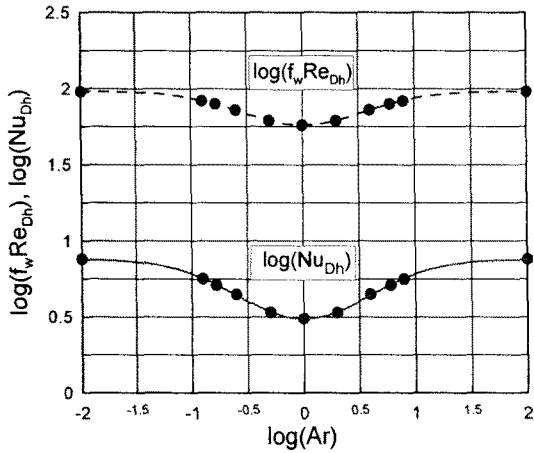


Fig. 4. Coefficient of f_w and Nu_{Dh} of laminar flow inside rectangular tube.

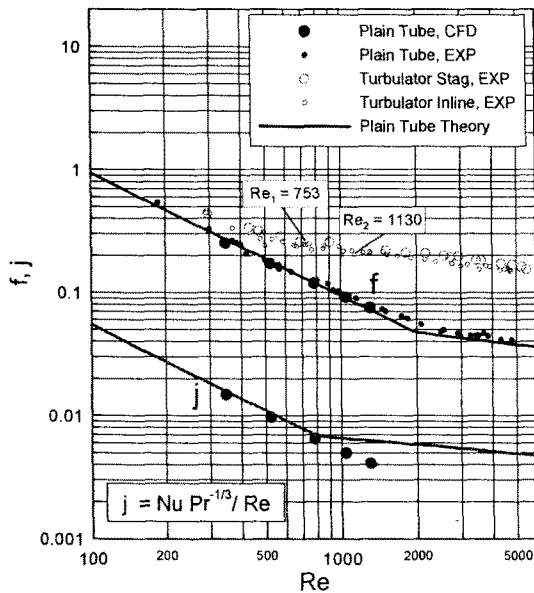


Fig. 5. Comparison of thermal and hydraulic performance according to the flat tubes geometries.

매끈한 관에서 난류유동에서 Blasius의 관 마찰계수에 대한 실험식과 Dittus and Boelter에 의한 상관식은 다음과 같다.

$$f_w = 0.316 Re_{Dh}^{-0.25}, \quad 2,000 < Re_{Dh} < 20,000 \quad (4)$$

$$Nu_{Dh} = 0.023 Re_{Dh}^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

평활 관, 2종의 터블레이터 관의 확대모형에 대하여 실험을 수행한 결과와 수치해석 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 평활 관의 압력강하(f factor)에 대하여 수치해석 결과는 본 실험결과와

잘 일치하였다. 평활 관에 대한 수치해석은 층류에 대한 것이다. 실험결과에서 평활 관의 압력강하는 Re수가 약 800에서 천이가 시작되는 것을 알 수 있다. Re수 3,000에서 완전 난류로 발달한다. 수치계산에서 층류에서 난류가 천이 되는 Re수 임계 값을 예측하기 어렵다. 그림에서 실선은 매끈한 평활 관의 완전 층류와 난류에 대한 마찰계수의 이론 값이다. 여기서 층류영역은 사각 관에 대한 식을 난류영역은 Blasius의 이론식을 이용하였다. 층류영역에서 수치해석에 의한 결과는 이론식과 잘 일치하였다.

사각 관 내부에 터블레이터가 설치된 형상에 대하여 터블레이터가 정방향(inline) 배열과 엇갈림(staggered) 배열에 대하여 실험을 수행하였다. 수치계산은 엇갈림 배열 터블레이터에 대한 것이다. 터블레이터 관 내부의 유동을 Re수 753에서 천이가 시작되고, Re수 1,130에서 난류가 시작된다. 시험결과 터블레이터 깊이가 같은 터블레이터 관에서 엇갈림 배열이 정방향 배열보다 수% 정도 높은 것을 알 수 있다. 터블레이터 관에 대한 수치계산에서 Re수 760까지는 층류모형을 Re수 1,100 이상은 난류 모형을 적용하였다. 수치계산 결과는 실험 결과보다 수% 작게 나타났다.

본 실험 결과로부터 수치계산은 실험결과와 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 평활 관에서는 임계 Re수가 1,000과 3,000이 천이와 완전 난류의 시작점 임을 알 수 있었다. 터블레이터 관에서는 임계 Re수가 753과 1,130이 천이와 완전 난류의 시작점 이었다.

4. 결론

차량용 열교환기의 사각관 내부유동 특성을 검증하고자 실험 및 수치계산을 수행하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평활 관과 터블레이터 관의 층류, 천이, 난류 유동특성을 확인하였다.
2. 평활 사각관은 층류 완전발달영역과 난류영역에서 모두 관 마찰계수와 열전달계수는 기존의 이론식과 잘 일치한다.
3. 평활 및 터블레이터 사각관의 천이영역에서 압력강하에 대한 실험결과를 제공하였다.
4. 터블레이터가 설치된 사각관의 난류영역에서 압력강하 특성은 수치계산으로 잘 예측되었다.
5. 완전 발달층류 영역에서 사각 관의 단면 종횡비의 변화에 따라 사용할 수 있는 압력강하 및 열전달 상관식을 제공하였다.

본 연구 결과는 사각관 내부 유동에 대한 관련 기술자와 연구자의 이해와 설계 능력 향상에 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York., U. S. A.
- [2] Davenport, C. J., 1983, Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Louvered Heat Exchanger Surfaces, in Heat Exchangers: Theory and Practice, J. Taborek, G. F., Hewitt, and N. Afgan, Eds., Hemisphere Publishing Corp., Washington, D. C., pp. 387-412.
- [3] Webb, R. L. and Trauger, P., 1991, Flow Structure in the Louvered Fin Heat Exchanger Geometry, Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol. 4, pp. 205-217.

- [4] Sahnoun, A. and Webb, R. L., 1992, Prediction of Heat Transfer and Friction for Louver Fin Geometry, J. of Heat Transfer, Vol. 114, pp. 893-899.
- [5] Kanjino, M. and Hiramatsu, M., 1987, Research and development of automotive heat exchangers, in Heat Transfer in High Technology and Power Engineering, Yang, W. J. and Mori, Y. Eds., Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., pp.420-432.
- [6] Kays, W. M., Crawford, M., 1980, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw Hill, New York, 2nd ed., pp. 200, pp. 257.
- [7] 강희찬, 김무환, 1997, 2열 원 튜브 열교환기의 공기측 압력 강하 및 열전달 특성 고찰을 위한 확대모형실험, 대한기계학회 논문집, 제 21권, pp. 113-124.
- [8] 강희찬, 김무환, 김명수, 2000, 액정법을 이용한 원-관 열교환기 원의 열적 특성에 관한 연구, 공기조화.냉동공학회 논문집, 제 12권 제 4호, pp. 414-421.
- [9] Mills, A. F., 1995, Heat and Mass Transfer, Irwin Inc., Chicago, U. S. A.