

거친사각채널에서 왕복운동이 열전달에 미치는 효과

안 수 환* · 손 강 필**

The Effect of Reciprocating Motion on Heat Transfer in the Roughened Rectangular Channel

S - W Ahn* · K - P Son**

Key words : Heat Transfer(열전달), Reciprocating Frequency(왕복동주파수), Rectangular Channel(사각채널), Two Dimensional Ridge Type Roughness(이차원 돌출형 거칠기)

Abstract

The influence of reciprocating frequency and radius on heat transfer in the roughened rectangular channel is experimentally investigated. The aspect ratio (width/height) of the duct is 2.33 and the rib height is one fifteenth of the duct height. And the ratio of rib-to-rib distance to rib height is 10. The discrete ribs were periodically attached to the bottom wall of the duct with a parallel orientation. The parametric test matrix involves Reynolds number, reciprocating, and reciprocating radius, in the ranges, 1,000 ~ 6,000, 1.7 ~ 2.5 Hz and 7 ~ 15cm, respectively. The combined effects of reciprocating frequency and reciprocating radius have considerable influence on the heat transfer due to the modified vortex flow structure.

기 호 설 명

c : 정압비열 [kJ/kgK]

De : 시험부 덕트의 수력직경 [m]

e : 거칠기 높이 [m]

H : 시험부 높이 [m]

k_f : 냉각수의 열전도도 [W/mK]

Nu : 너셀트수

Nu_{∞} : 왕복운동이 일어나지 않고 매끈한 경우의 너셀트수

P : 거칠기 피치 [m]

Pr : 프란틀수

Pu : 맥동수 [Hz]

q_f : 대류 열유속 [W/m²]

r : 왕복회전 반경 [m]

Re : 레이놀즈수

* 경상대학교 수송기계공학부 해양산업연구소

** 경상대학교 대학원 기관공학과

- T_f : 유체 평균 온도 [K]
- T_w : 바닥면 온도 [K]
- W : 시험부 폭 [m]
- W_m : 평균유체 이송속도 [m/s]
- x : 축방향 거리 [m]
- v : 동점도 [m^2/s]
- ω : 회전각속도 [rad]

1. 서 론

선박용 동력장치인 디젤기관에서 연료소비를 최소화하기 위해서는 고온, 고압의 실린더를 이용하는 선박추진용 기관을 열역학적으로 최적화하는 일이 필요하다. 최근 선박엔진의 발전추세는 추진효율과 엔진효율을 향상시켜 연료소비량을 감소시키는데 있다. 그 방법으로 실린더 직경에 대한 행정(stroke)의 비를 증가시켜왔으며, 그로 인하여 엔진속도를 크게 줄일 수 있었다. 이렇게 추진기관의 속도를 적게 함으로서 실린더의 최대압력과 온도가 크게 상승하게 되었다. 최근의 Sulzer RTA 60C엔진에서는 실린더 최대압력과 온도 그리고 실린더 직경이 각각 155 bar, 1500°C 그리고 600 mm이며 각 실린더가 91 ~ 114 rpm의 속도에서 2369 kW 동력을 발생하였다.^[1] 이러한 기술적 발전으로 인하여 지난 10년 동안에 엔진효율이 계속 상승하였다. 그 결과 연소실의 가장 중요한 부품인 피스톤은 매우 조악한 환경에서 작동하게 되었다. 이러한 환경에서 피스톤에 받는 열적 및 기계적 부하를 보상하기 위해서는 피스톤 크라운(crown)과 냉각시스템의 구조를 수정함이 요구되었다. 그러나 피스톤이 왕복운동을 하는 성질 때문에 냉각 시스템 내에 순환하는 냉각유는 주기적으로 물체력(body force)을 받게 된다. 그러므로 최적의 냉각시스템구조를 제작하기 위해서는 유동장에 의한 냉각성능에 미치는 왕복운동의 영향을 고려하지 않을 수 없다. 박용기관에서 실린더 자켓구조에 따른 냉각성능의 연구에 대해서는 많이 행하여졌으나 왕복운동이 열전달에 미치는 효과에 대해서는 매우 드문 실정이다.^[2] 왕복운동에 의해 발생하는 맥동유동은 덕트내 유체를 주기적으로 가열 혹은 냉각시키고, 주유동(main stream)에 비정

상적 와(vortices)를 만들어 채널내부의 국부 열전달을 변화시킨다.^{[3][4]} 그리고 Chang^[2]은 평활한 면의 냉각통로에서 왕복운동에 의한 열전달의 증가보다 냉각통로 벽면에 거칠기를 설치한 경우의 열전달 증가가 큼을 보였다. 이는 거친 사각채널에서 채널이 왕복운동을 하면, 거칠기에 의해 발생하는 와류와 왕복운동이 유동장에 미치는 복합적 유동특성 때문에, 열전달을 더욱 크게 향상시킬 수 있으리라 사료된다. 그리고 덕트내 유체유동 중에서 반경방향의 유체혼합이 열전달계수를 향상시키는 결정적 역할을 한다고 보고하였다.^[6] 움직임이 있는 다양한 냉각시스템에서 발생하는 요동(oscillating)과 맥동(pulsating)의 유동기구에 관한 연구는 Ralph^[7], Ghaddar^[8] 그리고 Greinder et al.^[9]이 행하였다.

일반적으로 요동이나 맥동유동이 주유동(main stream)에 합쳐질 때, 배플핀이 부착된 덕트 벽이거나 곡선과형 혹은 홈(groove)형 채널인 경우 벽면 근처에는 시간변수 와(eddy)운동이 관찰되었다.^{[7][8]} 그러므로 이러한 채널에서 발생하는 유체혼합이 열전달성능을 더욱 향상시키는 것으로 알려져 있다. 국내의 연구로는 변 등^[10]이 이론적 연구로부터 왕복유동을 하는 다공질(porous) 물체의 비정상 열전달성능을 예측하였고, 권 등^[11]은 정지된 사각덕트에서 단락된 요철이 열전달에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 행한 바 있다. 권 등의 실험조건은 작동유체를 공기를 사용하였고 요철간 거리는 요철높이의 10배이었으며 열전달 실험대신 물질전달 실험으로부터 열/물질 전달계수를 얻었다. 본 연구에서는 왕복운동이 일어나는 열산업기기를 최적화된 열역학적 구조로 제작하기 위한 기초 자료를 제공하기 위해 왕복운동을 하는 단락된 핀(fin)을 설치한 사각덕트의 시험부에서 왕복행정길이, 왕복운동 주파수, 그리고 유량 변화가 열전달에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 장치

왕복동 운동을 하는 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 왕복동 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 열전달 시험부를 직선 왕복동 운동을 할 수 있는 롤러가

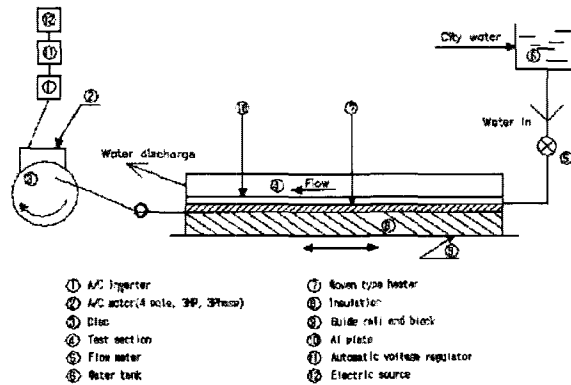


Fig. 1 Schematics of experimental setup



Fig. 2 Detail of rib arrangement

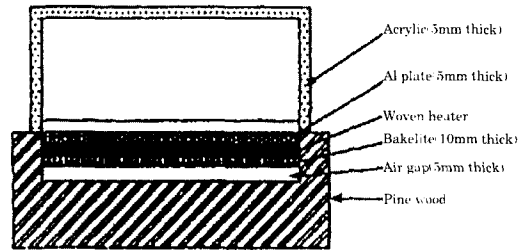


Fig. 3 Adiabatic system

이드 위에 설치하였다. 직사각형 덕트의 치수는 180 cm(L) x 3 cm(H) x 7 cm(W)이며 바닥에는 5 mm 두께의 알루미늄판을, 그리고 벽면과 상부 판은 투명 아크릴 판을 사용하여 시험부의 내부유동을 쉽게 확인할 수 있게 하였다. 시험부 바닥의 알루미늄판 밑에는 온도조절장치가 부착된 단상의 히터(woven type, HTWC, Omega Co.)를 설치하고 고온전도성 접착제 (Omegabond 400, Omega Co.)로 접착시켰다. 단열장치로는 히터에 1cm 두께의 베이커라이트, 0.5 cm의 공간을두고 맨 밑에는 1.5cm의 송판을 설치하였다 (Fig. 3). 시험부 단열장치 옆과 밑에 설치된 송판 외벽면의 온도를 측정하여 열전도 손실을 점검하였다. 주위의 온도는 모든 실험과정에서 23 °C와 26 °C의 사이에 들었다. 온도 측정은 수온온도계로 보정한 자료획득장치(Fluke Hydra)로 행하였다. 히터의 가열량(watt)은 위상 차가 없는 단상의 교류전원을 사용하였고 전류계(HIOKI 3282)와 전압계 (FLUKE 787)로 측정하였다. 작동유체는 오염(fouling)이

비교적 적은 수돗물을 사용하였고 시험부에 정상상태로 유체를 공급하기 위하여 시험부보다 1.5 m 높은 곳의 탱크를 통과하도록 하였다. 시험부 입구와 출구에 설치된 밸브를 이용하여 유량을 조절하였다. 그리고 시험부에 유입되는 물의 온도를 일정하게 유지하기 위해 시험부에서 나오는 물을 재순환하지 않고 자석식 펌프 (magnetic pump)에 의하여 외부로 배출하는 개방순출형 구조로 제작하였다. 유량은 10 mili-liter까지 측정이 가능한 적층식 (cumulative type)유량계와 시계 (timer)를 사용하여 측정하였다. 시험부 출구에는 유체 배압의 영향을 줄이기 위해 교축 밸브를 사용하였다. 시험부의 왕복동 장치 (reciprocating system)에서 속도 변환은 인버터 (Model # 23P7E5, Samsung)를 사용하여 회전주파수가 0.8 Hz에서 60 Hz까지 조절 가능하도록 하였으나 본 연구에서는 편의상 낮은 주파수인 1.7 Hz, 2.2 Hz, 그리고 2.6 Hz에 대해 실험을 행하였다. 회전 기기는 3 kW, 4 극 그리고, 3 상인 교류전동기는 사용하였

다. 회전운동을 직선운동으로 변환하는 장치는 Fig. 1과 같이 교류전동기 축에 반경 20 cm인 원판을 설치하고 원판의 구멍 (hole)에 연접 봉을 연결하여 제작하였다.

회전반경(r)이 7cm, 11cm 그리고 15 cm인 경우에 대한 실험을 행하여 행정 (stroke)길이의 효과를 조사하였다. 온도측정센서는 0.3 mmφ인 테프론 코팅의 k형 열전대를 사용하였고 바닥 중심선의 11개소에 설치하였다. 열전대는 시험 부의 유체 평균온도 상승을 측정하기 위해 입구와 출구 2개소, 시험부 바닥 중심부 9개소에 설치하였다. 시험부 바닥면 온도측정용 열전 대는 2mm 깊이와 10mm 길이의 홈을 파고 열에폭시 (Loctite 384)로 고정하였다. 시험부 바닥면에 설치된 거칠기는 알루미늄으로 2x2mm의 정사각형 막대로 제작하였다. 거칠기 간의 거리(P)는 높이(e)의 10배이다. 요철의 충돌각은 90°로 하였다. 거칠기효과를 조사하기 위해 Fig. 2와 같이 거칠기를 배열하였다. Fig. 1의형상과 열경계조건에 기초를 두고, 냉각수의 온도변화가 프란틀 수(Pr)에 크게 변화를 주지 않는다면, 왕복운동을 하는 시험부의 강제대류에 대한 무차원 열전달 관계식은 공식(1)과 같다.

$$Nu = Nu(Re, Pu, x) \tag{1}$$

여기서

$$Nu = q_k De/k_f (T_w - T_f) \tag{2}$$

$$Re = Wm De/\nu \tag{3}$$

$$Pu = \omega r/Wm \tag{4}$$

이다. q_k , De , k_f , ω , Wm , 그리고 ν 는 각각 대류열 유속, 시험부덕트의 수력직경, 냉각수의 열전도도, 회전각속도, 평균유체 이송속도, 그리고 동점도이고 T_w 와 T_f 는 바닥면과 유체평균 온도이다. 공식 (4)에서 정의 된 맥동수(Pu)는 왕복운동력과 대류관성력 간의 시간평균 힘의 비를 나타낸다. Dittus - Boelter의 실험식^[13]은 본 연구와 같이 채널이 움직이는 경우의 열전달계수 예측에는 유효하지 않지만 편의상 왕복운동을 하는 채널유동에서 거칠기 효과를 밝히기 위해 아래의 Dittus -

Boelter의 실험식^[13]을 사용하였다.

$$Nu_{\infty} = 0.023Pr^{0.4}Re^{0.8} \tag{5}$$

열전달시험은 처음에는 왕복운동이 일어나지 않는 상태에서 한후, 레이놀즈수가 1,000에서 6,000의 범위에서 실시하였다. 그후 왕복동이 일어나는 경우에 대한 실험을 행하였다. 매 실험마다 유체유동과 가열상태는 유체가 평형상태를 도달하도록 약 30분 동안 일정하게 유지 시켰다. 평형상태에 도달한 후 유체온도와 바닥면온도를 측정하였다. 실험의 불확실성은 Kline and McIntock^[14]에 의해 결정하였으며 레이놀즈 수, 맥동 수, 그리고 너셀트수의 불확실성은 각각 8 %, 5 %, 그리고 26 %이었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 매끈한 사각채널에서 왕복운동 주파수 (Hz)에 대한 너셀트 수의 효과를 나타낸다. 대체로 왕복동 주파수가 클수록 너셀트 수가 증가하였다. 이는 왕복동 주파수가 클수록 유체유동의 난류혼합이 증대하기 때문이라 사료된다. 정지상태의 경우 비교를 위해 공식(5)의 Dittus-Boelter의 실험식^[13]을 포함하였다. 비교적 잘 일치 함을 보였다. 낮은 레이놀즈수에서는 왕복운동을 하는 경우와 왕복운동을 하지 않는 경우와의 너셀트수 차이는 비교적 작았지만, 레이놀즈수가 클수록 너셀트수의 차이가 확대되었다. 이는 채널내 흐르는 유속이 클수록 난류혼합에 큰 영향을 미치기 때문이라 사료된다. 모든 경우에서 레이놀즈수가 증가할수록 너셀트수가 증가하였는데, 이는 레이놀즈수가 증가할수록 채널내 가열벽면온도 (T_w)와 유체체적평균온도(T_b)와의 차이가 시험부 입출구에 흐르는 유체에 가열된 열량의 차이($mc(T_{out} - T_{in})$)보다 크게 증가되었기 때문이라 사료된다. Dittus-Boelter의 실험식은 레이놀즈수가 2,500이상에서 유효하고 레이놀즈수가 2,300이하의 층류유동에서는 너셀트수가 사각채널의 경우 약 4정도이다. 그러나 Fig.4의 너셀트수는 이보다 훨씬 클 값을 보인다. 이는 본연구와 같은 왕복동시설의 실험장치는 입구길이를 충분히 길게 만들 수 없고 시험부

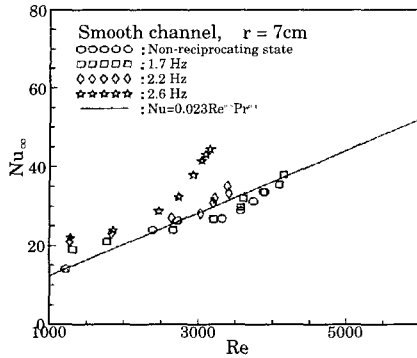


Fig. 4 Nusselt number at non-reciprocating smooth channel

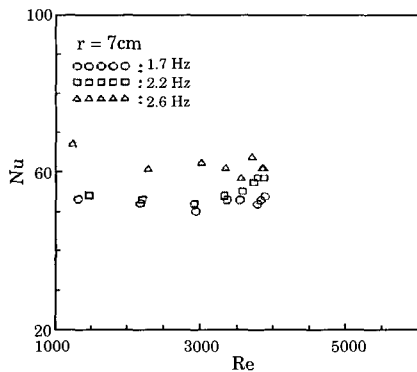


Fig. 5 Nusselt number with various reciprocating frequency level

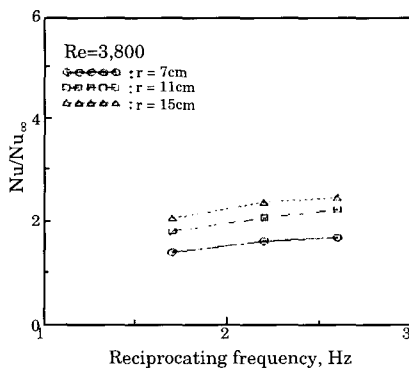


Fig. 6 Dimensionless Nusselt number vs. reciprocating radius

입출구가 팽창수축된 구조이기 때문에 실험의 영역범위는 모두 난류유동을 속한 것으로 사료된다. 거칠기가 설치된 채널에서 왕복동 주파수가 너셀트수에 미치는 영향은 Fig. 5에 나타내었다. Fig.

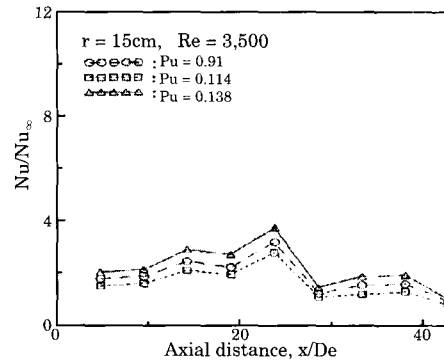


Fig. 7 Dimensionless local Nusselt number versus pulsating number.

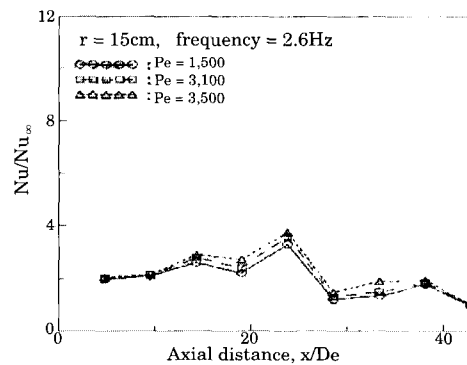


Fig. 8 Dimensionless Nusselt number vs. Reynolds number.

4과 유사하게 왕복동운동의 주파수가 증가할수록 무차원 너셀트 수가 증가하였다. 이는 왕복 운동이 증가하면 거칠기가 설치된 벽면에서 발생한 무질서한 와 (eddy)의 세기가 증가되어 유체혼합을 향상시키기 때문이라 사료된다. 난류유동에서 열전달계수는 Fig. 4와 같이 레이놀즈수가 클수록 대체로 너셀트수가 증가하는 경우가 많다. 그러나 거칠기가 설치되고 왕복동운동을 하는 본 연구에서는 너셀트수가 레이놀즈수에 무관하게 변하였다. 이는 본 연구처럼 유량이 작은 거친 채널의 유동양상은 레이놀즈수보다 왕복동 주파수에 더 많은 영향을 받기 때문이라 사료된다. 본 연구의 경우 채널 내 유동양상을 파악하는 데에는 레이놀즈수 만으로는 정확히 예측할 수 없다고 판단된다. 레이놀즈수가 3,800에서 왕복동 운동 회전반경이 7, 11, 그리고 15cm에 대한 너셀트수를 매끈하고 정지된 채널의 너셀트수(Nu_{∞})로 무차원한 값을 Fig. 6에

나타내었다. 모든 경우 너셀트수가 매끈하고 정지된 채널의 너셀트수보다 컸다. 이는 왕복운동 회전반경과 주파수가 채널내 주유동(main stream)에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 입증한다고 사료된다. 레이놀즈수가 3,500이고 왕복운동반경이 15cm인 경우 시험부 길이에 따른 국부 너셀트수(local Nusselt number)분포는 Fig. 7과 같다. 3개의 맥동수 ($Pu=0.091, 0.114, \text{ 그리고 } 0.138$)에서 모두 $x/De=23$ 근처에서 너셀트수가 정점 (peak)을 보였고, 이러한 정점은 왕복운동과 거칠기에 의해 발생하는 이차유동(secondary flow)때문이라 보고되고 있다.^[14] 시험부 출구보다 입구측에서 무차원 너셀트수가 컸는데 이는 출구측에는 유동유체에 배압이 작용하기 때문이라 사료된다. 맥동수가 증가할수록 무차원 너셀트수가 증가하였는데, 이는 맥동수도 거칠기를 설치한 것과 마찬가지로 무차원 너셀트수를 변화시키는 인자가 된다는 것을 보여준다. Fig. 8은 왕복운동반경이 15cm이고 왕복동 주파수가 2.6Hz인 경우 시험부 길이에 따른 무차원 국부 너셀트수의 변화를 보여준다. 3개의 레이놀즈수 ($Re = 1,500, 3,100, \text{ 그리고 } 3,500$)에 대한 무차원 너셀트수의 경향은 Fig. 7과 유사하나, 레이놀즈수에 따른 무차원 너셀트수의 변화는 맥동수에 의한 경우보다 작았다. 이는 채널내의 유량보다 왕복운동이 채널내 흐르는 유체의 층류저층을 파괴하여 이차유동을 증가시켜 대류열전달을 용이하게 하는 유체혼합에 더 많은 영향을 주기 때문이라 사료된다.

4. 결 론

- (1) 대체로 시험부 출구가 입구측보다 너셀트 수가 감소하는 경향을 보인다.
- (2) 왕복 주파수와 왕복운동반경이 클수록 너셀트수가 증가하였다
- (3) 왕복운동을 하는 거친 사각채널에서 너셀트수는 레이놀즈수보다 왕복동 주파수의 변화에 더 많은 영향을 받았다.

(4) 거칠기가 설치된 왕복운동을하는 채널은 정지된 상태보다 너셀트 수가 크게 나타났고, 특히 레이놀즈수가 낮을 경우 매끈하고 왕복운동이 일어나지 않는 경우보다 차이가 컸다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었고 실험장치 제작에 조언을 해준 부경대 김영복 교수에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Aeberli, A., Sulzer RTA 60C - The New Generation Two-Stroke Propulsion Engine, Marine News, WARTSILANS CORPORAION pp. 4-6, 1999.
- [2] Chang, S. W., "Heat Transfer of Orthogonal Mode Reciprocating Tube Fitted With Twisted Tape", J. Exp. Heat Transfer, Vol. 13, pp. 61-68, 2000.
- [3] Chang, S. W. and Su, L. M., Yang, T. L., and Hwang, C. C., "An Experimental Study of Heat Transfer in Reciprocating Square Duct Fitted With Ribs Skewed to The Flow", ASME J. Heat transfer Vol. 121 pp. 232-236, 1999.
- [4] Chang, S. W. and Su, L. M., Hwang, C. C., and Yang, T. L., "Heat Transfer in a Reciprocating Duct Fitted With Transverse Ribs", J. Exp. Heat Transfer Vol. 12, pp. 95-115, 1999.
- [5] Chang, S. W. and Su, L. M., "Influence of Reciprocating Motion on Heat Transfer Inside Ribbed Duct With Application to Piston Cooling in Marine Diesel Engine", J. Ship Res., Vol. 41, No. 4, pp. 332-339, 1997.
- [6] Roberts, E. P. L., and Mackley, M. R., "The Development of Asymmetry and Period Coupling for Oscillatory Flow in Baffled Channels", J. Fluid Mechanics, Vol. 328, pp. 19-48, 1996.
- [7] Ralph, M. E., "Oscillatory Flows in Wavy-Walled Tubes", J. Fluid Mechanics, Vol. 168, pp. 515-540, 1986.
- [8] Ghaddar, N. K., Magen, M., Mikic, B. B., and Patera, A. T., "Numerical Investigation of Incompressible Flow in Grooved Channel, Part

2. Resonance and Oscillatory Heat Transfer Enhancement", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 168, pp. 541-567, 1986.

[9] Greiner, M, "An Experimental Investigation of Resonant Heat Transfer Enhancement in Grooved Channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, pp. 1383-1391, 1991.

[10] 변수영, 이대영, 노승탁, "왕복유동조건에서 다공질물질의 비정상 열전달", *대한기계학회논문집 B*, 제 25권, 제 3호, pp. 422-432, 2001.

[11] 권혁진, 우성제, 조형희, "사각덕트내부 열전달향상을 위한 요철의 단락효과", *대한기계학회논문집 B*, 제 24권 제 5호, pp. 744-752, 2000.

[12] Hwang, J. J., "Heat Transfer-Friction Characteristic Comparison in Rectangular Ducts With Slit and Solid Ribs mounted on One Wall", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 709-716, 1998.

[13] Dittus, F. W., and Boelter, L. M. K., *Univ. Calif. (Berkeley) Pub. Eng.*, Vol. 2, pp. 443, 1930.

[14] Kline S. J. and McClintock, F. A., "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3 ~ 8, 1953.

[15] Han J. C., Zhang, Y. M., and Lee, C. P.,

"Augmented Heat Transfer Channels With Parallel, Crossed, and V-Shaped Angle Ribs", *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 590 ~ 596, 1991.

저자 소개



안수환(安守煥)

1953년생. 1976년 부산수대 졸업. 1981년 부산수대 대학원 졸업(석사). 1990년 캐나다 Ottawa 대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1995년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(박사) 1980년~현재 경상대학교 기계항공공학부 교수. 당학회 회원



손강필(孫强弼)

2001년 경상대학교 기관공학과 졸업. 2001년~현재 경상대학교 대학원 기관공학과 재학중.