한국박용기관학회지 제29권, 제2호, pp. 161~167, 2005. 3 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineers

왕복운동을 하는 사각채널에서 가열벽면의 수가 열전달에 미치는 효과

안수환† · 김명호* · 배성택*

(원고접수일 : 2004년 4월 6일, 심사완료일 : 2005년 2월 2일)

Effect of Number of Heating Walls on Heat Transfer in the Reciprocating Square Channel

Soo-Whan Ahn† · Myung-Ho Kim* · Sung-Taek Bae*

Abstract : The improvements of the propulsive engine efficiencies could reduce the fuel consumption. Therefore, for a marine main diesel engine, the substantial increase of stroke bore ratio, so that the engine speed can be significantly reduced in order to increase the propulsive efficiency. As a typical example, a Sulzer RTA 60C engine has a cylinder diameter of 600 mm and each cylinder is capable of delivering 2,369 kW in the speed range 91-114 rpm. In order to provide basic data for thermal system of marine engine, this work performs an experimental study of heat transfer in a square channel with one rib-roughened wall under single mode of reciprocating oscillation. A selection of heat transfer measurements illustrates the manner by which the reciprocating channel with two opposite heating walls has the higher heat transfer performance than with four heating wall.

Key words : Reciprocating square duct (왕복운동을 하는 사각덕트), Water jacket of diesel engine (디젤기관 냉각수 자켓), Number of heating walls (가열벽면의 수), Nusselt number(누셀트수)

기호설명

D_h : 수력직경 [m]
e : 거칠기 높이 [m]
h : 열전달 계수 [W/m^{2}K]
k : 작동유체의 열전도도 [W/mK]
$\dot{m}$: 유동질량 [kg/s]
Nu : 누셀트수 $\frac{h D_h}{k}$
P : 거칠기 피치 [m]
r : 왕복운동 반경 [m]
Re : 레이놀즈 수, $u_b D_h/v$

† 책임저자(경상대학교 기계항공공학부 해양산업 연구소), E-mail : swahn@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel : 055)640-3125
* 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

P_r : 프란틀수, ν/α
$\dot{Q}$: 열전달율 [W]
T : 온도 [K]
v : 동점도 [m^2/s]

아래 첨자

b : 체적평균
bi : 입구 체적 평균
bo : 출구 체적 평균
bx : 국부 체적 평균
w : 바닥면

1. 서 론

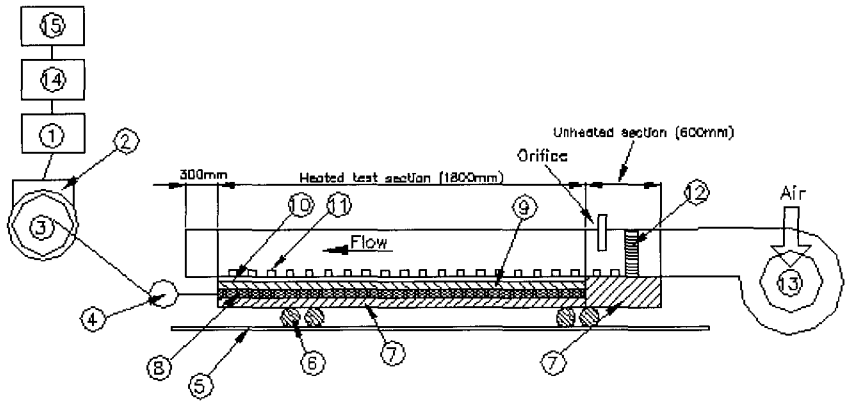
최근의 Sulzer RTA 60C엔진에서는 실린더 최대압력과 온도가 각각 155 bar와 1,773K인 경우 실린더직경이 600 mm이고 각 실린더가 91~114 rpm의 속도에서 2,369 kW 동력을 발생하였다.[1] 이러한 기술적 발전으로 인하여 엔진효율은 크게 상승하였지만, 연소실의 주요 부품 중 하나인 피스톤은 매우 조악한 환경에서 작동하게 되었다. 이렇게 피스톤에 받는 열적 및 기계적 부하를 보상하기 위해서는 피스톤 크라운과 냉각시스템 구조의 개선이 요구되었다. 그러나 피스톤이 왕복운동을 하는 특성 때문에 냉각 시스템 내부를 순환하는 냉각수는 주기적인 물체력을 받게 된다. 그러므로 최적의 냉각시스템구조를 제작하는 데에는 유동장과 냉각성능에 미치는 왕복운동의 영향을 무시할 수 없다.

박용기관에서 피스톤 크라운 하부의 냉각장치성능 향상에 관해서는 많이 연구되어졌으나, 왕복운동이 실린더의 열전달에 미치는 효과에 대해서는 거의 찾아 볼 수 없는 형편이다[2]. 특히 난류유동의 경우는 더욱 찾아보기 어려운 형편이다. 거친 사각채널에서 왕복운동을 하는 경우가 정지된 평활채널보다 열전달을 크게 향상시키는 것은 거칠기에 의해 발생하는 와류와 채널내 유동장에 작용하는 왕복운동의 복합적 영향에 의해 발생하는 유동특성 때문이라 생각된다. 그리고 덕트내 유체유동 중에서 반경방향의 유체혼합이 열전달계수를 향상시키는 결정적 역할을 한다고 보고하였다[3]. 움직임이 있는 다양한 냉각시스템에 대한 유동기구를 밝히기 위해 요동(oscillatory)과 맥동(pulsating)유동에 대한 연구들이 행해진바 있다[4, 6]. 일반적으로 요동이나 맥동유동이 주유동(main stream)에 합쳐 질 때, 배플판이 덕트벽에 부착되었거나 덕트가 곡선파형 혹은 홈(groove)형 채널인 경우 거친 벽면 근처에는 시간변수와(eddy)운동이 관찰되었다[4, 5]. 그러므로 이러한 채널에서 증가된 유체 혼합이 열전달성능을 향상시킨다. 왕복동 운동 힘이 발생하는 왕복동 채널유동은 벽면에 거칠기를 설치한 것과 유사한 효과를 얻을 수 있어 열전달 성능을 크게 증가시킬 수 있었다. 국내의 연구로는 변 등[7]이 이론적 연구로부터 왕복유동을 하는 다공질(porous) 물체의 비정상 열전달을 예측하였고, 권 등[8]은 정지된 사각덕트에서 단락된 요철의 열전달에 대한 실험적 연구를 행한 바 있다. 권 등의 실험 조건은 작동유체로 공기를 사용하였고, 요철간 거리는 요철높이의 10배 이였으며 열전달 실험 대신 물질전달 실험으로부터 열/물질 전달계수를 얻었다. 손[9]은 왕복운동을 하는 사각채널에 삽입된 테이퍼의 형상이 열전달에 미치는 영향에 대해 조사한바 있다.

본 연구의 목적은 매끈한 사각 채널인 경우 가열하는 벽면의 수에 따른 무차원 열전달계수(누셀트수)는 일정한 것으로 알려져 있지만, 일부의 벽이 거칠기가 있는 경우에는 가열벽면의 조건에 따라 누셀트 수가 달라질 것이라 사료된다. 그러나 이에 대한 정량적 자료가 아직 거의 없는 실정이라 이에 대한 기초 실험적 자료를 제공하고자한다. 그러므로 왕복운동을 하는 사각덕트에서 바닥에만 거칠기를 설치하고 시험부에서 가열벽면의 수, 왕복운동 회전수(rpm), 그리고 유량 변화에 대한 열전달 효과를 조사하였다.

2. 실험 장치

왕복동 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 왕복동 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 열전달 시험부



① AC inverter	⑥ Guide block	⑪ Rib
② AC motor	⑦ Pine wood	⑫ Honeycomb
③ Disk	⑧ Gasket	⑬ Blower
④ Connecting rod	⑨ Woven type heater	⑭ Automatic voltage regulator
⑤ Guide rail	⑩ Al plate	⑮ Electric source

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

를 왕복동 운동을 하는 왕복동장치 위에 설치하였다. 정사각형 덕트의 전체 길이는 2,400 mm이며 실제 시험부는 1,800 mm×30 mm×30 mm이다. 벽면과 상부는 열전도도와 가공성을 고려해 목재를 사용했고 정사각형 채널면에 5 mm 두께의 알루미늄판을 설치하였다.

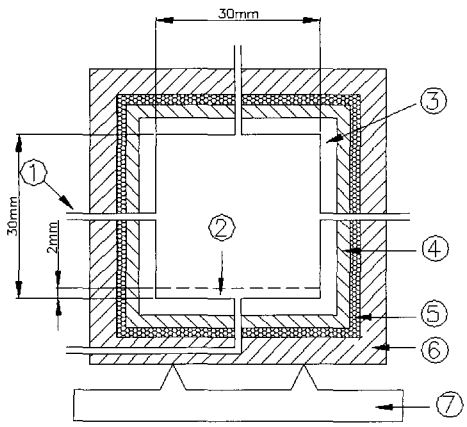


Fig. 2 Cross section of teat section

시험부 바닥의 알루미늄판 밑에는 온도조절장치가 부착된 히터 (HTWC, Omega Co.)를 설치하고 고온전도성 접착제 (Omegabond 400, Omega Co.)로 접착시켰다. 단열장치로는 Fig. 2와 같이 히터 밑에 단열재를 설치하였다. 주위의 온도는 모든 실험과정에서 300K와 303K의 범위에 들었다. 온도 측정은 T형 열전대를 이용하여 수은 온도계로 보정한 자료획득 장치(Yokogawa Inc.)를이용 하였다. 거칠기는 Fig. 3과 같이 시험부 바닥에만 설치하고 거칠기는 2 mm×2 mm의 사각봉으로 충돌각은 45°로 하였다.

거칠기 피치 대 거칠기 높이의 비(P/e)는 8이 되도록 거칠기를 배치하였다. 작동유체는 공기를 사용하였고 시험부에 균질류(homogeneous flow)로 유체를 공급하기 위하여 허니컴(honeycomb)을 설치하였다. 시험부 입구에 설치된 조절기를 이용하여 유량을 조절하였다. 유량은 시험부 출구측에 설치되어있는 유량계(floating type)로 보정된 정밀차압계(FCO12 Furness Control

Ltd.)를 이용하여 측정하였다. 시험부의 왕복동 장치에서 속도 변환은 인버터(Model # 23P7E5, Samsung)를 사용하여 회전수를 조절 가능하도록 하였으나 본 연구에서는 편의상 낮은 회전수인 33 rpm, 40 rpm 그리고 46 rpm으로 실험을 하였다. 회전기기는 3 kW, 4극 그리고, 3 상인 교류전동기를 사용하였다. 회전운동을 직선운동으로의 변환은 교류전동기에 반경 200 mm인 원판을 설치하고 원판에 설치된 구멍(hole)에 연접봉을 연결하여 반경을 110 mm로 고정하여 실험 하였다. 그리고 시험부 바닥에는 가이드레일(guide rail)과 블록(block)을 설치하였다.

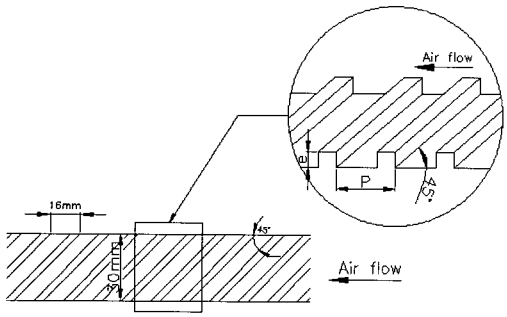
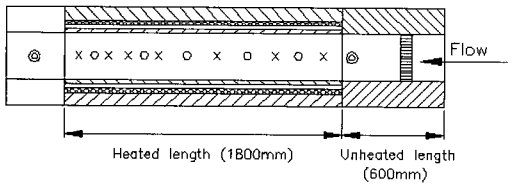


Fig. 3 Rib arrangement on bottom wall



ⓞ Bulk temperature × Wall temperature
○ Static pressure

Fig. 4 Temperature and static pressure measurement position in square channel (each wall has an identical one)

Table 1 Experimental conditions

Dimensions of heated test section	30×30×1800 mm
RPM	33, 40, 46
Re range	7,400 ~ 25,000
Attack angle	45°
Square rib	2 × 2 mm
Roughness pitch	16 mm

실험중 원활한 작동을 위해 수시로 가이드레일에 윤활유를 주유하였다. 시험부 바닥의 알루미늄판 밑에는 온도조절장치가 부착된 히터(HTWC, Omega Co.)를 설치하고 고온전도성 접착제(Omegabond 400, Omega Co.)로 접착시켰다. 출구측 체적평균온도는 채널중간바닥에서 상방향으로 측정된 국부온도값의 평균하여 구한값으로 구하였다. Fig. 4는 가열된 시험부의 열전대 설치위치를 나타낸다. 벽면온도계로 전체 가열벽면의 온도를 측정하여 균일한지 확인하고, 열전대는 각 면의 중심선에 설치하였다. Table 1은 본 연구의 실험장치의 크기와 실험 패러메터를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

열전달계수(h)는 열전달율($\dot{Q}$)과 바닥벽면(T_w) 및 평균온도(T_b)로부터 아래와 같이 구할 수 있었다.

$$h = \frac{\dot{Q}}{A(T_w - T_b)} \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{bo} - T_{bi}) \quad (2)$$

여기서 A는 열전달면적이다. 열적으로 충분히 발달된 영역(thermally developed regime)의 채널에서 T_w와 T_b값은 모두 길이방향 길이에 따라 선형적으로 증가하였고 그 두값의 차이는 변화가 거의 없었다. 열전달계수는 식(1)과 (2)로부터 구했기 때문에 전도손실과 복사손실은 별도로 측정하지 않았다. 식(1)으로부터 얻어진 대류열전달계수(h)로부터 누셀트수(Nu)는 아래와 같이 정의된다.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

그리고 k는 공기의 열전도도이다. Fig. 5는 레이놀즈수가 7,600인 경우 거리에 따른 왕복동 주파수에 대한 국부(local) 누셀트수 변화를 보여준다. 2 측면에만 가열한 경우의 국부 누셀트수가 4 측면 모두 가열한 경우보다 누셀트수가 컸다. 이는 가열면적에서 거칠기가 설치된 면적의 비율이 크기 때문이라 생각된다. 대체로 시험부의 매분당

회전수(rpm)가 증가할수록 누셀트수가 증가하였다. 이는 매분당회전수가 증가할수록 채널 내를 왕복동 회전수가 클수록 난류 혼합이 증가되기 때문이라 판단된다. Fig. 6과 7은 레이놀즈수가 19,100과 24,800인 경우 거리에 따른 왕복동주파수에 대한 국부(local) 누셀트수 변화를 보여준다. 앞의 그림들과 같이 레이놀즈수가 증가 할수록 누셀트수가 증가 한다. 이는 앞의 그림과 같이 유속이 클수록 난류가 발달하기 때문이라 생각된다. Figs. 6과 7의 경우와 달리, Fig. 5에서는 $x/D_h=20\sim30$에서 감소하였다. 이는 낮은 레이놀즈수이기 때문에 채널왕복운동이 주유에 영향을 주기 때문이라 생각된다. $x/D_h=30$근처에서 급격히 변하고 있다. 이는 본 연구의 경우 왕복운동이 있기 때문에 입구영역의 길이가 길어지며, $x/D_h=30$ 근처에서 온도경계층의 두께가 두껍게 되는 영역에 해당되기 때문이라 사료된다. Fig. 8은 왕복운동을 하는 사각채널에서 2면만 가열한 경우의 채널전체 길이에 대한 평균 누셀트수이다. Fig. 7과 같이 매분회전수와 레이놀즈수가 증가 할수록 평균 누셀트수도 증가함을 보여준다. Fig. 9는 왕복운동을 하는 사각채널에서 4 면 모두 가열한 경우의 채널 전체길이에 대한 평균 누셀트수의 변화이다. 앞의 두면만 가열한 경우보다 누셀트수가 적음을 보여준다. 이는 국부 누셀트수의 경우와 마찬가지로 가열면적 중에서 거칠기가 설치된 면적의 비율이 크기 때문이라 사료된다.

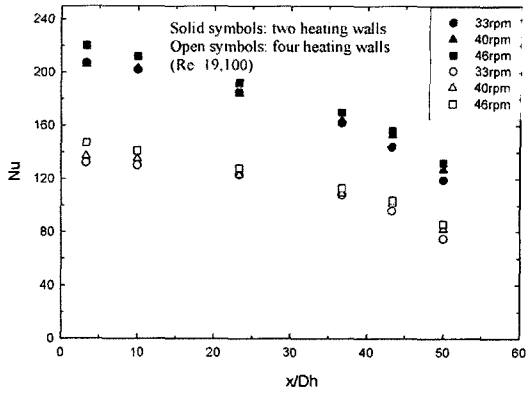


Fig. 6 Local Nusselt number against axial distance

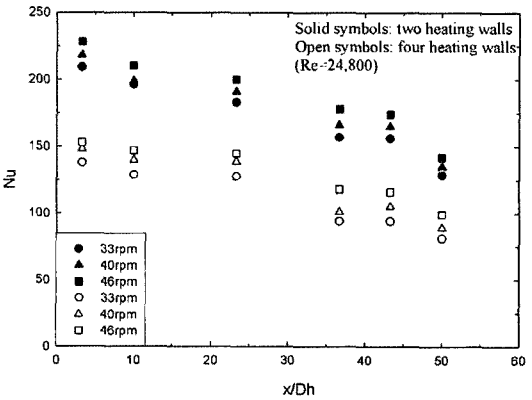


Fig. 7 Local Nusselt number against axial distance

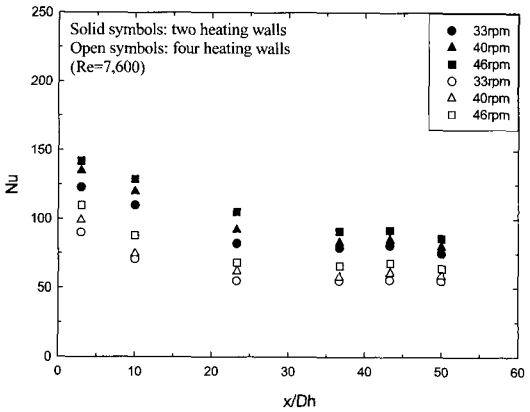


Fig. 5 Local Nusselt number against axial distance

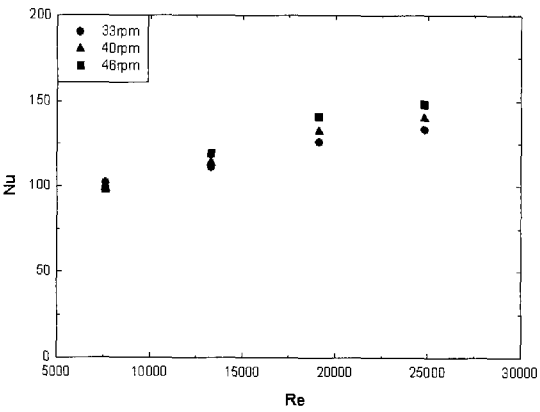


Fig. 8 Average Nusselt number for two heating walls

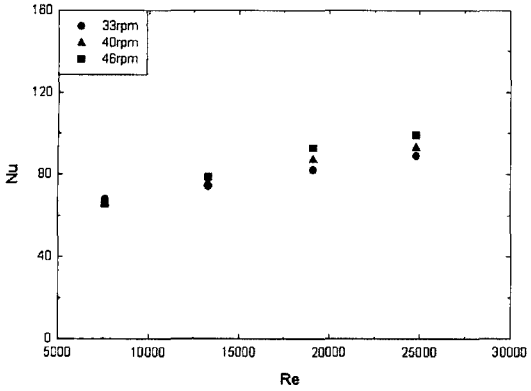


Fig. 9 Average Nusselt number for four heating walls

4. 결 론

왕복운동을 하는 사각채널에서 바닥벽면에만 거칠기를 설치하고 시험부에서 가열벽면의 수, 왕복운동 회전수, 그리고 유량변화가 열전달에 미치는 영향을 조사한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 45° 충돌 각을 갖는 거칠기를 바닥에만 설치한 사각채널에서 가열 벽면의 수가 누셀트수에 미치는 영향을 정량적으로 밝혔다.

(2) 2 면 가열의 경우가 4 면 가열의 경우보다 누셀트 수보다 1.3~1.6 배 증가 하였다.

(3) 왕복동 채널의 매분당회전수(rpm)가 클수록 누셀트수가 컸다. 즉, 4벽면 가열의 경우 레이놀즈수가 24,800일 때 46 rpm이 33 rpm 보다 누셀트수가 1.1배 증가하였다.

(4) 국부 누셀트수는 입구측에서 대체로 큰 값을 나타내었다.

이 논문은 2003년도 학술진흥재단 지원연구(KRF-2003-002-D00044)와 지방대학 혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참고문헌

[1] A. Aeberli, "Sulzer RTA 60C-The New Generation Two-Stroke Propulsion Engine", Marine News, CORPORATION (2) pp. 4-6, 1999.

[2] S. W. Chang, "Heat Transfer of Orthogonal Mode Reciprocating Tube Fitted With Twisted Tape", J. Exp. Heat Transfer, Vol. 13, pp. 61-68, 2000.

[3] E. P. L. Roberts and M. R. Mackley, "The Development of Asymmetry and Period Coupling for Oscillatory Flow in Baffled Channels", J. Fluid Mechanics, Vol. 328, pp. 19-48, 1996.

[4] M. E Ralph, "Oscillatory Flows in Wavy-Walled Tubes, J. Fluid Mechanics", Vol. 168, pp. 515-540, 1986.

[5] N. K. Ghaddar, M. Magen, B. B. Mikic and A. T. Patera, "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.

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

[7] 변수영, 이대영, 노승탁, "왕복유동조건에서 다공질물질의 비정상 열전달", 대한기계학회 논문집 B, 제 25권, 제 3호, pp. 422-432, 2001.

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

[9] 손강필, "왕복운동을 하는 사각채널에서 열전달촉진기구가 열전달에 미치는 효과", 경상대학교 기관공학과 석사학위논문, pp. 1-71, 2003.

저 자 소 개

안수환 (安守煥)

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

김명호 (金明鎬)

1978년생, 2004년 경상대학교 기계항공공학부 졸업, 2004년~현재 경상대학교 대학원 기계시스템공학부 재학.

배성택 (裵成擇)

1976년생, 2002년 경상대학교 기관공학과 졸업, 2004년 경상대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 2004년 11월~현재 (주)태건 근무.