

브레이징 환-관 열교환기의 공기측 열유동 성능평가

강 희 찬[†], 강 민 철*
 군산대학교 기계공학부, *군산대학교 대학원

Evaluation of Air-side Pressure Drop and Heat Transfer Performance of Brazing Fin-tube Heat Exchanger

Hie-Chan Kang[†], Min-Cheol Kang*
 Faculty of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea
 *Graduate School, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

(Received July 23, 2003; revision received October 4, 2003)

ABSTRACT: The present work was conducted to investigate the air-side thermal-hydraulic performance of the brazing fin-tube heat exchanger. Pressure drop and heat transfer coefficient for a plain and a louvered fin configuration were compared numerically and experimentally. It was found that the heat transfer characteristics for the plain fin were similar to the developing flow in the rectangular channel. The louver fin showed about twice better heat transfer coefficient than the plain fin. Previous empirical correlations presented by Davenport, Sunden and Svantesson, Sahnoun and Webb, Chang and Wang, Achaichia and Cowell, and Kang were compared with the present experimental data.

Key words: Heat exchanger(열교환기), Heat transfer coefficient(열전달계수), Pressure drop(압력강하), Louver fin(루우버 환), Brazing(브레이징), Radiator(라디에이터)

———— 기 호 설 명 ————

- A : 열교환기의 표면적 [m^2]
- A_c : 열교환기의 최소 유동면적 [m^2]
- D_h : 수력 직경 [m]
- f : 압력강하계수
- F_d : 흐름방향 환의 깊이 [m]
- F_b : 환 피치 [m]
- F_{th} : 환 두께 [m]
- h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
- H : 환 높이 [m]

- j : Colburn j 계수
- j_p : 표면효율을 제외한 j 계수
- k_f : 환의 열전도율 [$W/m \cdot K$]
- L_b : 루우버 피치 [m]
- Pr : Prandtl 수
- Re_{L_b} : 루우버 피치 기준 Reynolds 수, $\rho u_c L_b / \mu$
- Re_{D_h} : 수력 직경 기준 Reynolds 수, $\rho u_c D_h / \mu$
- ΔT_{in} : 대수평균온도차 [K]
- u_c : 최소단면에서 풍속 [m/s]
- V : 체적 [m^3]

그리스 문자

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-63-469-4722; Fax: +82-63-469-4727
 E-mail address: hckang@kunsan.ac.kr

η : 표면효율
 θ : 루우버 각도

1. 서 론

공기를 대상으로 하는 열교환기에서 공기측 열저항은 열교환기의 전체 열저항 중 70% 이상을 차지한다. 환은 이러한 공기측 열저항을 줄이기 위하여 사용되는 필수적인 요소이다. 전열성능은 환의 형상에 따라 크게 변화한다. 그리고 환은 열교환기의 성능, 중량, 가격, 소음 및 생산성 등 여러 인자에 영향을 미친다.

압력강하는 줄이고 전열성능은 향상시키기 위하여 브레이징 열교환기에 대한 여러 연구가 진행되었다. Kays and London⁽¹⁾은 7가지 루우버 환의 열전달과 압력강하에 대한 실험 데이터를 발표하였다. Davenport,⁽²⁾ Achaichia and Cowell,⁽³⁾ Sunden and Svantesson,⁽⁴⁾ Sahnoun and Webb,⁽⁵⁾ Chang et al.,^(6,8) 그리고 Kang et al.⁽⁹⁾ 여러 연구자들은 루우버 환에 대한 실험상관식을 제시하였다. Kanjino and Hiramatsu⁽¹⁰⁾은 루우버 사이의 유동에 대한 가시화 실험을 수행하여 이후 연구자들이 루우버 환의 열유동 특성을 이해하는 데 기여하였다. Kang and Kim^(11,12)은 모형실험을 이용한 열교환기 성능평가 방법을 소개하였다. Kang and Webb^(13,14)은 다양한 환 형상에 대한 성능자료를 소개하였다.

본 연구에서는 최근 자동차에 많이 사용되는 브레이징 열교환기의 공기측 열유동 특성을 수치 및 실험적으로 연구하였다. 열교환기 환의 형상은 평판 환(plain fin)과 루우버 환(louver fin)이다. 평판 환의 열유동 특성은 실험, 수치 및 이론

적인 방법으로 검토하였다. 루우버 환의 연구결과는 선행 연구자들의 상관식과 비교하고 고찰하였다.

2. 실험 및 수치계산

2.1 열교환기 성능실험

본 논문에서는 자동차 라디에이터와 공조기에 사용되는 브레이징 열교환기를 연구대상으로 하였다. Fig.1은 본 연구의 실험대상인 평판 환과 루우버 환의 사진이다. 루우버 환의 환 피치, 환 두께, 환 깊이 등 외관 규격은 평판 환과 같다. 루우버 환은 피치가 4.2mm, 각도가 27°인 루우버 8개로 구성되어 있다. 열교환기의 상세한 규격은 Fig.2와 Table 1과 같다.

열교환기는 열풍동에서 성능을 평가하였다. 시험한 열교환기 시료의 단위 환의 수는 140개 이

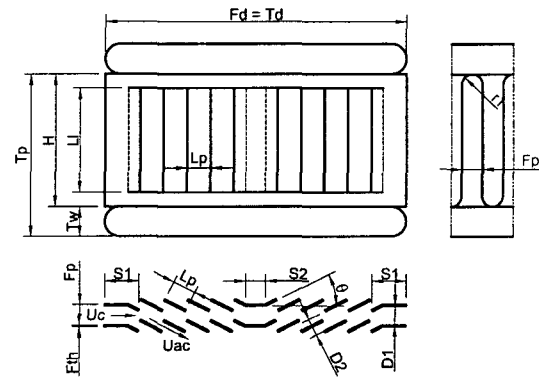


Fig. 2 Schematic diagram of heat exchanger having louver fin.

Table 1 Dimensions of the heat exchanger tested in the present work

Parameter	Symbol	Dimension
Fin material	-	Aluminum
Thermal conductivity	k	222 W/m·°C
Fin pitch	F_p	3.75 mm
Depth of fin	F_d	54.0 mm
Fin thickness	F_{th}	0.27 mm
Fin height	H	24.0 mm
Louver pitch	L_p	4.2 mm
Louver angle	θ	27°

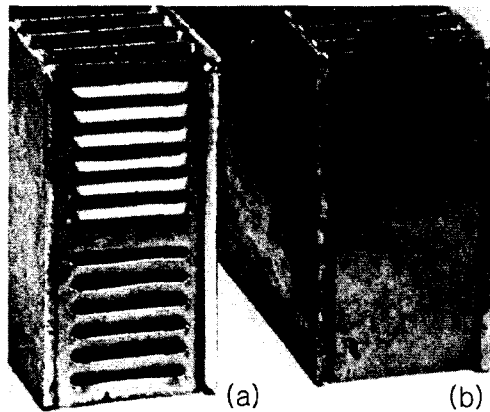


Fig. 1 Fin shape tested in the present work (a) louver fin, (b) plain fin.

다. 열교환기 시료의 양면에 판형 전기가열기를 부착하여 가열하였다. 가열량은 전력계(Yokagawa, WT210)로 측정하였다. 열교환기에 대하여 공기 유량, 압력강하, 공기의 입구온도, 출구온도 및 가열량을 측정하였다. 전면풍속은 0.6~2.3 m/s의 범위에서 실험하였다. 자세한 실험장치와 실험방법은 Kang and Kim^(11,12)에 소개되어 있다.

측정한 결과로부터 Re_{Dh} , Re_{Lp} , f 및 j 계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho u_c D_h}{\mu} \quad (1)$$

$$Re_{Lp} = \frac{\rho u_c L_p}{\mu} \quad (2)$$

$$f = \frac{2A_c \Delta P}{A \rho u_c^2} \quad (3)$$

$$j = \frac{\eta h Pr^{2/3}}{\rho u_c c_p} \quad (4)$$

$$j_p = \frac{h Pr^{2/3}}{\rho u_c c_p} \quad (5)$$

$$h = \frac{Q}{A \Delta T_{in}} \quad (6)$$

$$D_h = \frac{4V}{A} \quad (7)$$

여기서 u_c , A , A_c , D_h , L_p 및 ΔT_{in} 은 각각 최소 단면의 유속, 열교환기 공기측 표면적, 최소 유동면적, 수력 직경, 루우버 피치 및 대수평균온도 차이이다. 여기서 j_p 는 j 계수에서 표면효율, η 을 제외한 값이다.

중간 전면풍속인 1.7 m/s에서 측정오차는 노즐 유량계의 차압은 2.0%, 압력강하는 1.0%, 온도는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 그리고 가열전압은 $\pm 0.1\text{ V}$ 로 평가되었다. 결과정리 프로그램에 각 요소의 오차를 입력하여 계산한 결과 Re_{Lp} , f 및 j 계수의 측정오차는 95% 신뢰수준에서 각각 1.0%, 1.7% 및 2.4%이었다.

2.2 수치해석

수치해석은 AEA사의 CFX4.4를 이용하여 해석하였다. 수치해석에서 수행한 전면풍속은 2.0, 3.5

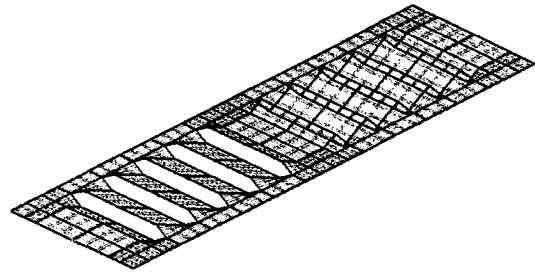


Fig. 3 Surface mesh of louver fin in the present numerical analysis.

그리고 5.0 m/s이다. 해석모델은 3차원 층류, 정상상태 및 비압축성 유동이며 경계조건은 균일유속, 균일입구온도 및 일정 벽온도 조건에 대하여 수행하였다. 계산은 3차 정확도의 Quick 기법을 사용하였다. 루우버 흰은 실험용 열교환기와 동일 형상에 대하여 계산격자를 구성하고 알루미늄 흰에서 열전도를 고려하였다. Fig. 3은 루우버 흰의 수치해석에 사용한 흰의 격자이다. 입구와 출구 영역의 길이는 각각 수력 직경의 1.5배와 25배로 하였다. 체적요소는 육면체로 하였다. 루우버 흰인 경우 요소체적의 수는 15만개, 37만개, 45만개 및 63만개에 대하여 수치계산을 수행하였고 요소체적의 수가 37만개 이상이면 f 와 j 값은 각각 3%와 2% 이내의 편차를 보였다. 수치계산에서 질량 잔류항의 절대값의 합이 입구질량의 10^{-5} 이하이고, 에너지 잔류항의 절대값의 합이 열전달량의 5×10^{-5} 이하일 때 수렴하였다고 판정하였다.

평판 흰의 수치계산에서 열교환기의 공기측을 사각덕트로 단순화하였다. 사각덕트의 벽온도는 일정하다고 가정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 루우버가 없는 평판 흰의 유동 및 열전달 특성을 비교한 그림이다. 그림에서 실험, 수치계산 그리고 이론식의 자료를 비교하였다. 실험으로 구한 j 계수는 표면효율이 100%인 경우에 대한 것이다. 이는 수치계산에서 벽온도가 일정한 조건에 상당한다. 실험의 f 와 j 계수는 수치계산 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 실험결과를 기준으로 수치계산은 압력강하를 약 18% 낮게 예측하며 열전달계수는 약 15% 높게 예측하였다. 본 해석에서 흰 용접부를 무시하고 단순한

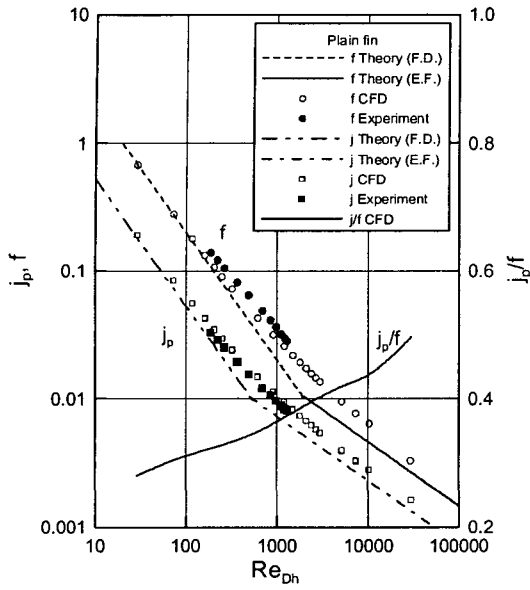


Fig. 4 Comparison of f and j factors of the plain fin.

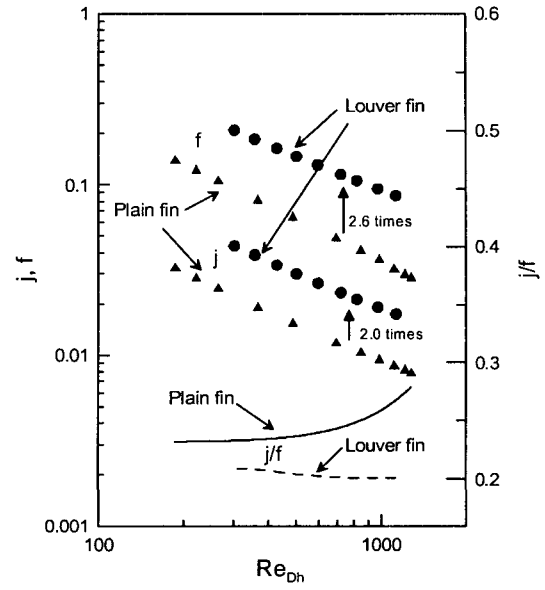


Fig. 6 Comparison of the performance of plain and louver fins.

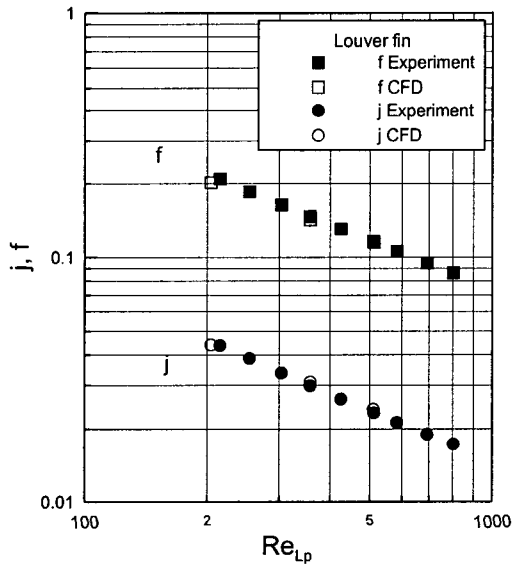


Fig. 5 Comparison of f and j factors of the louver fin.

사각덕트 형상에 대한 수치해석 결과가 실험 결과와 유사하다는 것은 시사하는 바가 크다.

그림에서 이론식은 사각덕트 내부에서 완전히 발달한 유동(점선과 이점쇄선, $D_h/F_d \rightarrow 0$)과 발달 중인 유동(일점쇄선과 직선, $D_h/F_d \rightarrow \infty$)의 두 극

한에 대한 것이다. 즉, 발달 중인 유동은 평판 위를 흐르는 외부유동과 같다. 모형실험 및 수치해석 결과는 두 이론식의 경향을 잘 반영하고 있다. 본 연구의 실험 영역인 $150 < Re_{Dh} < 1,300$ 의 유동특성은 발달 중인 유동에 근접한다고 할 수 있다. f 와 j 계수에 대한 이론식은 Re_{Dh} 수가 200 정도에서 천이하는 경향을 보이고 있다. 동일한 그림에 수치계산으로 구한 j/f 를 Re_{Dh} 에 대하여 도시하였다. 그림에서 j/f 는 압력손실에 대한 열전달의 상대적인 비율이다. 사각덕트에 대한 j/f 는 0.3에서 0.5로 Re_{Dh} 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 따라서 평판 환은 유속이 큰 유동에서 더 유리하다.

Fig. 5는 루우버 환에 대하여 실험과 수치계산의 압력강하와 열전달계수를 비교한 것이다. 실험결과를 기준으로 할 때 수치계산은 f 계수를 약 3% 하향 예측하며 j 계수에 대해서는 약 1% 상향 예측하였다. f 와 j 계수 모두 수치계산의 예측 성능은 우수한 것으로 평가된다.

Fig. 6은 평판 환과 루우버 환의 압력강하 및 열전달계수를 비교한 그림이다. Fig. 1과 같이 평판 환과 루우버 환의 외관규격은 동일하다. Re_{Dh} 수가 1,000일 때 평판 환에 대하여 루우버 환의 j 계수는 2.0배, f 계수는 2.6배 증가하였다. Webb⁽¹³⁾

은 동일한 수력 직경을 갖는 오프셋 스트립 환 (offset strip fin)과 평판 환을 비교한 바 있다. Re_{Dh} 수가 1,000일 때 평판 환에 대하여 오프셋 환의 j 계수는 2.5배, f 계수는 3배가 증가하였다고 보고하였다. 본 연구결과도 유사한 경향을 나타내었다. 평판 층류경계층 유동에서 국부항력계수와 열전달계수는 입구에서 거리의 0.5승에 반비례한다. 즉, 평판의 길이가 짧을수록 마찰 및 열전달계수는 크다. 따라서 압력강하와 열전달계수가 증가하는 주된 요인은 루우버 환은 평판 환에 비하여 공기의 흐름방향으로 루우버의 길이가 짧기 때문이다. 본 연구의 루우버 환은 3차원이므로 공기흐름의 일부는 루우버를 통과하지 않으며 여러 루우버에 의한 와류의 영향으로 인하여 이론적인 기대치에는 미치지 못한다.

Fig. 5와 Fig. 6의 실험결과에서 평판 환과 루우버 환에 대한 f 와 j 계수에 대한 상관식은 다음과 같다.

평판 환인 경우

$$f = 10.5 Re_{Dh}^{-0.83} \quad (8)$$

$$j = 1.48 Re_{Dh}^{-0.74} \quad (9)$$

$$150 < Re_{Dh} < 1300$$

루우버 환인 경우

$$f = 7.62 Re_{Lp}^{-0.67} \quad (10)$$

$$j = 2.13 Re_{Lp}^{-0.72} \quad (11)$$

$$200 < Re_{Lp} < 800$$

단, 위 식은 본 연구의 열교환기 형태에 대한 것이며 형상이 다른 경우 주의를 요한다.

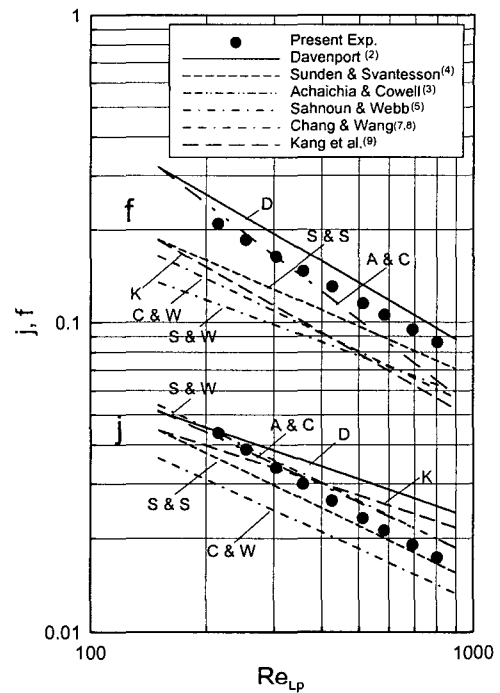


Fig. 7 Comparison of the present experimental data and empirical correlations for the louver fin.

Fig. 6에서 Re_{Dh} 수가 증가함에 따라 평판 환의 j/f 는 0.23에서 점차 증가하고, 루우버 환의 j/f 는 0.2 수준에서 소폭 감소하였다. 루우버 환인 경우 고속영역에서 마찰손실 대비 열전달 효율이 감소된다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 실험결과와 실험상관식을 비교한 것이다. 실험상관식에 사용된 루우버 환의 주요 제원은 Table 2와 같다. 본 연구대상 열교환기는 루우버 각도(θ)에 대하여 모든 상관식의 범주에 만족되나 환 높이(H)는 Davenport와 Achaichia and Cowell의 상관식, 그리고 환 피치(F_p)는 Davenport의

Table 2 Typical dimensions of the heat exchanger used in the comparison of empirical correlations

Investigator	H/L_p	F_p/L_p	F_d/L_p	θ (deg)
Present work	5.7	0.9	13	27
Davenport	2.6~8.5	0.5~1.0	13~27	8.4~27.8
Achaichia & Cowell	5.5~11	1.2~4.1	15~51	20~30
Sunden & Svantesson	7.2~16	1.1~3.8	29~96	19~29
Kang et al.	16	2.6	-	28
Chang & Wang	2.6~16	0.5~4.1	13~95	28

상관식의 범주에 속한다. Sahnoun and Webb의 상관식은 기하학적 형상에 비교적 유연성이 크다. Fig. 7에서 비교한 바와 같이 압력강하는 Davenport의 상관식이 실험결과와 비교적 잘 일치하며 Chang and Wang, Kang et al., 그리고 Sahnoun and Webb⁽⁵⁾의 상관식은 하향 예측하였다. 열전달계수는 Achaichia and Cowell, Sahnoun and Webb, 그리고 Sunden and Svantesson의 상관식이 실험결과와 약 10% 이내로 잘 일치하였다. 반면 Davenport는 상향 예측하며 Chang and Wang은 하향 예측하는 경향을 보였다.

4. 결 론

차량용 루우버(louver) 흰과 평판(plain) 흰 붙이 브레이징 열교환기의 공기측 열유동 특성을 실험 및 수치계산으로 평가하였다. 연구결과는 기존 이론 및 상관식과 비교하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 브레이징 열교환기에서 루우버 흰은 평판 흰에 비하여 압력강하와 열전달계수가 약 2배 증가하였다.

(2) 평판 흰 붙이 브레이징 열교환기의 열유동 성능은 사각덕트로 단순화한 수치계산 결과와 비교적 잘 일치한다. 또한 평판 흰의 열유동 특성은 사각덕트에 대한 이론식과 유사하였다.

(3) 루우버 흰에 대한 수치계산 결과는 실험결과와 비교할 때 압력강하와 열전달에 대하여 수 퍼센트 내로 일치하였다.

(4) 루우버 흰 열교환기에 대하여 6종의 시험 상관식과 비교하여 상용 루우버 흰 열교환기의 압력강하의 예측은 Davenport의 실험상관식이 상대적으로 유용하며 열전달성능의 예측은 Sunden, Sahnoun, 그리고 Achaichia의 실험상관식이 유용함을 알 수 있었다.

참고문헌

- Keys, W.M. and London, A.L., 1964, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill Inc., U.S.A.
- Davenport, C.J., 1983, Correlation for heat transfer and flow friction characteristics of louvered fin, AIChE Symp. Ser. 79, pp. 19-27.
- Achaichia, A. and Cowell, T.A., 1988, Heat transfer and pressure drop characteristics of flat tube and louvered plate fin surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 147-157.
- Sunden, B. and Svantesson, J., 1992, Correlation of j and f factors for multi-louvered heat exchanger surfaces, in *Proceedings of the 3rd UK National Heat Transfer Conf.*, pp. 805-811.
- 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.
- Chang, Y.J. and Wang, C.C., 1996, Air side performance of brazed aluminum heat exchangers, *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 3, pp. 15-28.
- Chang, Y.J. and Wang, C.C., 1997, A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 3, pp. 533-544.
- Chang, Y.J., Hus, K.C., Lin, Y.T. and Wang, C.C., 1999, A generalized friction correlation for louver fin geometry, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 2237-2243.
- Kang, B.H., Chang, H.J., Kim, S.Y. and Park, B.K., 2002, An experimental study on heat transfer and pressure drop of air side in a plate-louvered fin heat exchanger, *Proc. of Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 14, No. 6, pp. 485-492.
- 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.
- Kang, H.C. and Kim, M.H., 1999, Effect of strip location on the air-side pressure drop and heat transfer in strip fin-and-tube heat exchanger, *Int. J. of Refrig.*, Vol. 22, pp. 302-312.
- Kang, H.C. and Kim, M.H., 2001, Dehumi-

- difying performance of material-saving fin in fin-tube heat exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 13, pp. 730-738.
13. Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York., U. S. A.
14. Kang, H. C. and Webb, R. L., 1998, Performance comparison enhanced fin geometries used in the fin-and-tube heat exchangers, Proceedings of the 11th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 6, pp. 273-278.