

액정법을 이용한 주름형상 판형열교환기의 열전달 성능해석

박성봉 · 이재용 · 김남진 · 김종보* · 서태범*

인하대 대학원, *인하대학교 기계공학과

Investigation of Heat Transfer Performance in Corrugated Plate Heat Exchanger Utilizing Liquid Crystal Method

Sung Bong Park, Jae Yong Lee, Nam Jin Kim,
Chong Bo Kim* and Tae Beom Seo*

Inha University Graduate School

**Inha University Department of Mechanical Engineering*

요 약

이 연구의 목적은 액정법을 이용하여 주름형상 판형열교환기에서의 내부유동과 열전달 성능의 특성을 파악하는데 있으며 공기를 작동유체로 사용하였다. 과거에는 실험이 주로 판형열교환기의 입·출구에서의 열전달 성능에만 관심이 집중되었다. 그러나 이 실험에서는 액정법을 이용하여 판형열교환기 셀표면위에서의 국소 누셀트수의 분포를 연구하였다. 레이놀즈수가 증가할수록 열전달 성능은 증가하였으나 마찰계수는 감소하였다. 주름각이 증가할수록 열전달 성능과 마찰계수는 모두 증가하였다. 국소 누셀트수 분포로부터 열전달이 잘 일어나는 부분은 주름을 타고 넘어들어온 두 유동이 만나는 곳이며 또한, 셀의 가운데 부분은 셀의 수직단면적이 커서 셀표면과 유동의 접촉이 약하므로 작은 누셀트수를 가지는 것을 알 수 있다.

Abstract — The purpose of the present study is to investigate the characteristics of internal flow and heat transfer performance of a corrugated plate heat exchanger by liquid crystal method where air is being utilized as a working fluid. Previous experimental studies mainly focus on the heat transfer performance at inlet and outlet of a plate heat exchanger. But in the present investigation, the local Nusselt number on the surface of a plate heat exchanger unitary cell has been obtained by liquid crystal method. It is shown that as the Reynolds number increases, the heat transfer performance increases and the friction factor decreases in a plate heat exchanger. And as the corrugation angle increases the heat transfer performance and friction factors also increase. From the distribution of local Nusselt number it is found that effective heat transfer occurs in the regions where two streams along the corrugated channels meet each other. In the central region, the Nusselt number is pretty low since it has large cross-sections resulting weak contact between the flow and the cell surface.

1. 서 론

산업혁명이후 급속한 에너지의 사용으로 인하여 화석 에너지원 자체가 고갈 되어가고 있으며, 또한, 에너지를 사용할 때 발생하는 여러 부산물들이 인류와 지구환경에 악영향을 미쳐 여러문제를 야기하고 있다. 이에 세계각국은 문제의 심각성을 인식하고, 기존의 CFC 및 HCFC 물질을 규제하고, 점진적으로 사용을 금지시키려는 의지를 보이는 한편, 이 문제해결과 에너지의 효율

적인 사용을 위해 많은 연구를 진행하고 있다. 더욱이 에너지 빈국인 우리나라로서는 에너지의 효율적인 이용이 무엇보다 중요하다 하겠다.

이러한 이유로 에너지의 절약 및 효율적 이용을 위해 열교환 문제의 중요성이 부각되고 있으며 열교환 현상을 이용하는 열교환기는 최근 수십년간 다양한 재질과 형태의 열교환기들이 개발되어 왔으나, 현재는 단위 부피당 전열 면적을 극대화시키는 주름진 형태의 열교환기가 각광을 받고 있다.

대표적인 주름진 열교환기에는 판형열교환기가 있는데, 이 또한 주름각, 골과 주름폭과의 비 등에 따라 다양한 열효율과 압력강하등을 나타내므로, 이에 대한 많은 연구가 필요하다.

주름진 판형열교환기(corrugated plate heat exchanger)는 1930년대에 최초로 제작되어 실용화되기 시작으나 초기의 판형열교환기는 온도와 압력의 사용한계가 매우 낮았으며, 열전달 효율도 또한 매우 낮고, 판의 두께도 상당히 두꺼웠다. 오늘날과 같은 형태의 판의 모양을 보이는 것은 1950년대 후반 빗살무늬(Herringbone) 개념이 도입되면서 부터이다. 판에 빗살무늬의 방향을 위아래로 엇갈리게 교대로 배치함으로써 열판 전체 면적에 걸쳐 점접촉이 이루어지게 하여, 강도와 사용압력의 한계를 증가시킬 수 있었다. 아울러 합성고무 제조기술의 발달에 힘입어 개스킷의 품질향상으로 사용 온도조건도 크게 향상되었다. 또한 이 열판의 빗살무늬는 열전달 성능도 크게 증가 시켰다. 따라서 종래의 셸-튜브(shell-and-tube) 열교환기 보다 훨씬 높은 열전달 효율을 달성하게 되었다.

이러한 주름진 판형열교환기의 성능을 해석하기 위해 Savostin과 Tikhonov^[1], Edwards^[2], Shah^[3], Focke^[4], Gaiser^[5], Bogaert^[6], Heggs^[7], Martin^[8] 등에 의해 많은 연구가 이루어져 왔으며 국내에서도 판형열교환기의 국산화를 위한 기술향상 및 성능평가 기법의 개발 또한 활발히 이루어지고 있으나 복잡한 형상으로 인하여 내부 유동에 따른 열전달 해석을 실험적 접근방법으로 해석한 예는 그다지 많지 않다. 이에 본 실험에서는 액정법을 사용하여 판형열교환기의 단위셀 표면의 국소 누셀트수의 분포를 도시하여 열적특성을 가시화하였다.

2. 실험장치 및 무차원 변수

2-1. 무차원 변수

본 실험모델의 셀의 주름단면은 Fig. 1과 같이 sine파형이다. 각 셀은 입구와 출구가 각각 2개씩이어서 유동은 화살표를 따라 흐른다. 열전달에 미치는 중요한 인

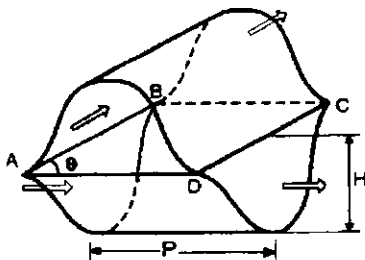


Fig. 1. Unitary cell.

자로는 주름과 주름사이의 거리인 피치 P, 주름의 높이 H, 주름각 θ 이고, 이들의 관계는 다음의 무차원 변수로 정리된다.

$$L = \frac{2E(\alpha, \pi/2)P^{(9)}}{\pi \cos \alpha} \quad (1)$$

$$E(\alpha, \Phi) = \int_0^\Phi \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \Phi'} d\Phi' \quad (2)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{\pi H/P}{\sqrt{[1 + (\pi H/P)^2]}} \quad (3)$$

$$U \equiv \frac{G}{\rho A_c} \quad (4)$$

$$Re \equiv \frac{UD_{eq}}{\nu} \quad (5)$$

$$f = \frac{|\Delta P| D_{eq}}{\rho \Delta a U^2/2} \quad (6)$$

$$Nu \equiv q_w \frac{D_{eq}}{(T_w - T_f)} \quad (7)$$

식(7)에서 T_w 는 국소 벽면온도, T_f 는 유입되는 공기온도, q_w 는 가해지는 열량이다. 또한 셸 내부의 체적 V와 측면의 넓이 S, 단면적 A_c , 입·출구사이의 거리 Δa 는 다음과 같이 정리된다.⁽⁹⁾

$$V = P^2 \frac{H_1}{\sin \theta} \quad (8)$$

$$S = \frac{2PL}{\sin \theta} \quad (9)$$

$$A_c = \frac{2PH_1 \sin(\theta/2)}{\sin \theta} \quad (10)$$

$$\Delta a = P \frac{\cos(\theta/2)}{\sin \theta} \quad (11)$$

2-2. 실험장치

실험장치는 크게 액정이 부착되어 열전달 효과를 실험하는 테스트부와 스테인레스 박판에 균일한 열량을 추가위한 전열부, 액정의 색상변화를 영상으로 촬영하는 영상취득부로 나뉘게 된다.

2-2-1. 테스트부

흡입팬에 의해 하니콤(honeycomb)을 지나 유입된 공기는 주름진 두 판을 위·아래로 겹쳐 만든 투명한 아크릴로 제작된 테스트 모델 안으로 유입된다. 주름형상은 sine파형으로 제작되었으며, 구체적인 치수는 Table

Table 1. Corrugation geometry.

P [mm]	40	P/H	3.07692
H [mm]	13	P/HI	4
H ₁ [mm]	10	θ[°]	30,45,60,75
D _{eq} [mm]	17.546		

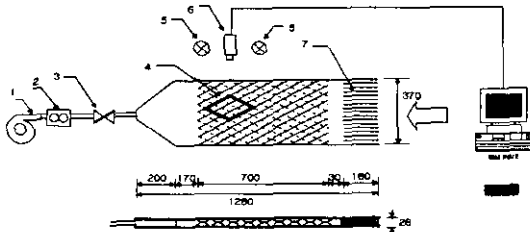


Fig. 2. Schematic diagram of experiment.

1. fan, 2. flowmeter, 3. valve, 4. test section, 5. light, 6. camera, 7. honeycomb, 8. PC. (unit: mm)

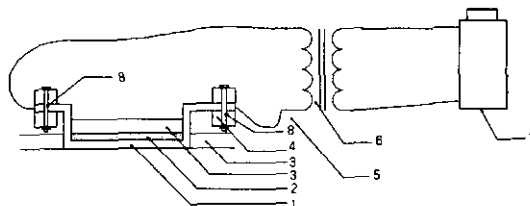


Fig. 3. Schematic diagram of electric circuit.

1. stainless steel foil, 2. liquid crystal sheet, 3. acrylic plate, 4. copper block, 5. electric wire, 6. transformer, 7. slidacs, 8. Bolt & nut.

1에 나타나 있다. 테스트 모델은 Fig. 2에 나와있는 바와 같이 가로, 세로 방향으로 각각 7~8개의 Fig. 1과 같은 셀을 가지고 있으며 양쪽 벽면은 막혀있다. 이때 벽면의 영향을 최대한 배제하면서 유동이 완전 발달된 영역을 관찰하기 위하여 윗주름판의 입구에서 6~7번째의 셀을 포함한 주위의 9개의 셀을 잘라내어 액정시트와 전열장치를 하여 색상변화를 촬영하였다.

2-2-2. 전열장치

테스트부에서 잘라낸 아크릴판에 0.03 mm 두께의 스테인레스 박판과 30°C~35°C의 반응온도폭을 가진 액정시트(Hallcrest co. 30C5W)를 양면테이프를 이용해 Fig. 3과 같이 부착한다. 스테인레스 박판을 가열하기 위한 전열장치로는 슬라이닥스(slidacs)와 변환기(transformer)를 사용하였으며 전류가 스테인레스 박판 표면에서 균일하게 흐르도록 하기 위해 구리블럭을 이용하여 스테인레스 박판과 변환기 사이를 구리전선으로 연결하였다.

2-2-3. 영상취득부

본 연구에 사용된 영상획득 및 처리장치는 NTSC(National Television System Committee) 방식으로 작동된다. 액정

의 색상정보는 CCD카메라(Panasonic, GP-KR222)에 의해 R.G.B 정보로 획득되어지며 이 영상은 PC에 내장된 영상처리장치(Data Translation, DT3153)로 보내어져 화면출력과 함께 하드디스크에 저장된다. 또한 영상촬영시 사용된 조명으로는 태양광과 가장 흡사한 3파장램프(20 W) 2개를 사용하였으며, 가열판과 카메라와의 거리는 1 m이다.

3. 실험 방법

3-1. 열전달 측정실험

본 실험은 작동유체로 공기를 사용하여 액정법중 정상상태(steady state)방법을 사용하여 주름진 판형열교환기 모델의 셀표면에서의 국소 뉴셀트수의 분포를 계산하여, 전체적인 열전달 효율을 구하였다.

액정법을 사용하기 위해 우선 색상값(hue)과 온도와의 식을 만드는 색상보정(calibration)을 하였다. 시트(sheet)타입 액정을 사용하여 30°C에서 35°C까지 매 0.1°C 마다의 색상변화를 T타입 열전대(Omega, HH21)와 컬러 CCD카메라(Panasonic, GP-KR222)를 사용하여 촬영하며 이때 조명 이외의 다른빛의 영향을 없애기 위하여 암막을 치고 촬영하였으며, 액정이 관찰각과 조명각 또는 거리가 달라지면 보이는 색상도 달라지는 특성이 있으므로 가열판으로 부터의 카메라와 조명의 거리와 각도는 실제 실험시와 동일한 조건으로 실험하였다. 또한 이번 실험과 같이 굴곡이 있는 모델에서는 카메라와 셀 표면의 각이 변하므로 한 개의 색상보정식만으로 전체 표면의 색상값을 온도로 환산하는 것은 부정확하므로 셀을 촬영각에 따라 세구간으로 나누어서 각기 별도로 보정식을 만들어 적용하였다. 촬영한 영상의 R.G.B. 정보를 색상값(hue)으로 변환한 후 온도와 일대일 대응시켜 3개의 $T = \text{fn}(\text{Hue})^{100}$ 의 함수를 만든다. 색상보정이 끝난 후, 액정과 전열장치를 설치한 잘라낸 아크릴판을 테스트 모델과 틈이 없도록 잘맞추어 밀봉하고, 전열장치로 일정한 열량을 주면서 각각의 레이놀즈 수에 맞게 흡입팬을 이용하여 공기를 유입시킨다. 유입된 공기는 가열된 스테인레스 박판과 열교환이 일어나 액정에 색상변화가 나타나며, 정상상태에 이르면 전류측정기(Digital clampmeter)를 사용하여 공급되고 있는 전류와 전압을 측정한 후, 카메라로 촬영한다. 촬영된 영상정보를 앞에서 만든 $T = \text{fn}(\text{Hue})$ 함수를 사용하여 표면전체의 색상정보를 온도로 변환시킨다.

3-2. 압력강하 실험

실험모델의 연속된 셀중 열전달 실험의 경우와 같이 입구에서 6~7번째 있는 셀을 중심으로 앞뒤로 주름을 따라 연속된 세 개의 셀의 중앙에 압력탭을 달아 공기를

홀려주며, 이때의 차압을 마이크로 마노미터(micro manometer, FURNESS, FCO12)를 사용하였으며 이를 식(6)에 대입하여 셀에서의 압력강하 f 를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 열전달

주름각과 레이놀즈수에 따른 셀에서의 평균누셀트수의 변화가 Fig. 4에 나와있다. 그림을 보면 주름각의 각도가 증가할수록 평균누셀트수가 증가 하며, 또한, $Re^{2/3}$ 를 나타내는 실선을 따라 증가함을 알 수 있다. Fig. 5은 각도에 대한 누셀트수의 증가성향을 보기 위해 각각의 누셀트수를 $\theta = 60^\circ$ 일때의 누셀트수로 나눈 것이며 이때 레이놀즈수에 관계없는 주름각과 평균누셀트수만의 관

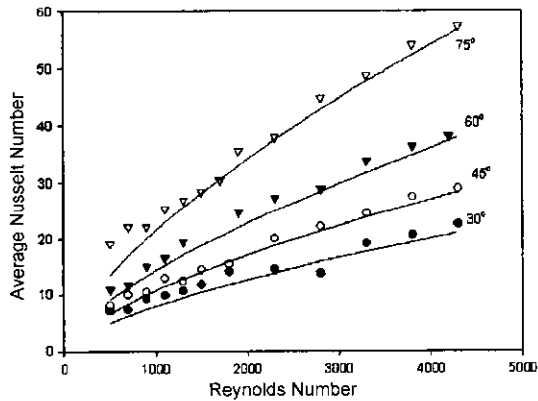


Fig. 4. Average Nusselt number as a function of Reynolds number for various corrugation angle.

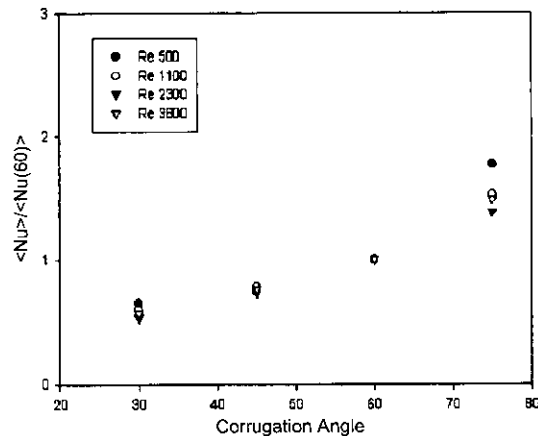


Fig. 5. Dependence of the average Nusselt number on the corrugation angle.

계가 성립함을 알 수 있으며, 주름각이 커질수록 평균 누셀트수는 급격히 증가함을 알 수 있다. Fig. 6의 $P/H = 4$ 인 경우 $\theta = 60^\circ$, $Re = 4200$ 과 $\theta = 75^\circ$, $Re = 3800$ 에서의 셀표면에서의 국소누셀트수(local Nusselt number)의 분포가 나와있다. 유동은 화살표방향으로 흐른다. 그림을 보면, 두 경우 모두 x축 방향으로 불매 유동이 주름을 타고 넘어 들어와 다시 셀표면과 재부착(reattachment)되는 우측면 끝단 부분에서 큰누셀트수를 가지며, 셀의 가운데 부분이 수직 단면적이 커서 유동과 표면의 접촉이 약하므로 작은값을 가지게 된다. 셀표면 전체적으로는 출구의 오른쪽 위, 즉 주름을 타고 넘어온 두 흐름이 만나서 정체되어 와류를 형성하는 부분에서 최대값

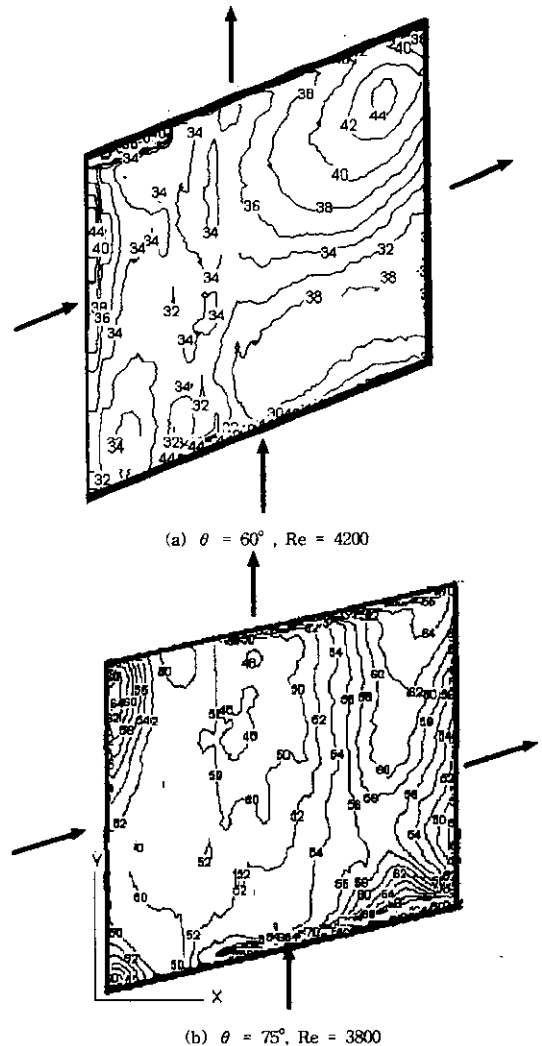


Fig. 6. Distribution of local Nusselt number.

을 갖는다. 그리고, 최소값은 셀의 수직 단면적이 가장 큰 중앙부분에서 길게 나타나는 것을 볼 수 있다.

4.2. 압력강하

Fig. 7에 레이놀즈수와 주름각에서의 마찰계수 f 와의 관계가 나와있다. 각도가 증가할수록 마찰계수 역시 증가하나, 레이놀즈수가 커질수록 마찰계수는 감소함을 볼 수 있다. Fig. 8은 주름각 $\theta = 60^\circ$ 일때의 마찰계수를 기준으로 각각의 마찰계수를 나눈 것이다. 앞의 열전달의 경우와 마찬가지로 레이놀즈수가 변하여도 마찰계수의 변화성향은 일정하며 또한 주름각이 증가할수록 마찰계수의 증가폭은 커지게 됨을 알 수 있다. 여기서 Fig. 5와 Fig. 8을 비교해 보면, 주름각의 증가에 따른 마찰계수의 증가가 누셀트수의 증가 보다 커지게 되는데, 예를 들어 주름 각이 $\theta = 60^\circ$ 에서 $\theta = 75^\circ$ 로 증가할 때의 누셀트수는 약 30~40% 증가한 반면, 마찰계수는 거의

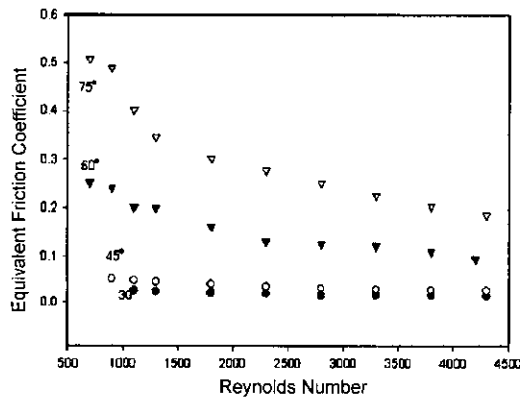


Fig. 7. Equivalent friction coefficient f as a function of the Reynolds number.

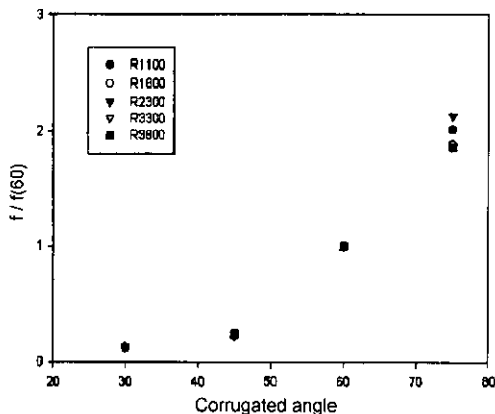


Fig. 8. Dependence of the equivalent friction factor f on the corrugated angle θ .

2배 가까이 증가하는 것으로 볼 때 적절한 주름각의 선택이 요구된다.

5. 결 론

본 실험에서는 공기를 작동유체로 하여 액정법을 이용한 주름진 형상의 판형열교환기의 모델을 실험하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 주름각과 레이놀즈수의 증가에 따라 열전달률도 증가한다.
2. 주름각이 커질수록 마찰계수는 증가하나 레이놀즈수가 증가할수록 마찰계수는 감소한다.
3. 레이놀즈수에 대한 마찰계수와 열전달의 증가 혹은 감소추세를 비교했을 때 마찰계수와 열전달효율 모두 별다른 영향을 미치지 않았다.
4. 주름각에 대한 마찰계수와 열전달의 증가 추세를 비교했을 때 주름각에 대한 열전달의 증가 추세보다 마찰계수의 증가 추세가 더 크게 나타난다.
5. 셀의 표면에서 열전달이 가장 잘 일어나는 곳은 유동이 주름을 타고 넘어들어와 다시 재부착되는 출구 끝단부분이며, 셀의 단면적이 가장 커서 유동과 셀의 표면의 접촉이 약한 기운에 부분은 가장 작은 누셀트수를 가진다.
6. 본 실험방법에 의하여 작동유체를 물로하는 실제 판형열교환기에서도 이와 유사한 방법으로 액정을 이용한 열전달 효율 및 내부유동의 해석이 가능하겠다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 특정연구개발과제로서 1999년 “해양온도차발전기술개발(OTEC)” 연구사업에 대한 지원을 받아 수행되었으며, 이에 모든 관계자들에게 감사의 뜻을 표합니다.

기호설명

- D_{eq} : hydraulic diameter [m]
- f : equivalent friction coefficient
- G : mass flow rate in unitary cell [kg/s]
- h : convective heat transfer coefficient [W/m^2K]
- H : height of corrugation [m]
- k : thermal conductivity [W/mK]
- L : auxiliary length [m]
- P : pitch of corrugation [m]
- Δp : pressure drop in unitary cell [Pa]
- q : heat flux [W/m^2]
- U : mean velocity [m/s]

그리스 문자

- α : auxiliary angle [°]
- θ : corrugation angle [°]
- ρ : density [kg/m³]
- Φ, Φ' : auxiliary angle [°]

참고문헌

1. Savostin, A.F. and Tikhonov, A.M.: "Investigation of the characteristics of plate-type heating surfaces", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28, pp. 1469-1479 (1989).
2. Edwards, M.F.: "Heat transfer and pressure drop characteristics of a plate heat exchanger using newtonian and non-newtonian liquids", *The Chemical Engineer*, Vol. 259, No. 1, pp. 185-191 (1974).
3. Shah, R.K.: "Compact heat exchanger selection methods", *Heat Transfer*, Vol. 4, pp. 185-191 (1978).
4. Focke, W.W., Zachariades, J. and Oliver, I.: "The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 8, pp. 1469-1479 (1989).
5. Gaiser, G. and Kottke, V.: "Flow phenomena and local heat and mass transfer in corrugated passages", *Chem. Eng. Tech.*, No. 12, pp. 400-405 (1989).
6. Bogaert, R. and Bolcs, A.: "Global performance of a prototype brazed plate heat exchanger in a large Reynolds number range", *Experimental Heat Transfer*, Taylor & Francis, No. 8, pp. 1469-1479 (1995).
7. Heggs, P.J., Sandham, P., Hallam, R.A. and Walton, C.: "Local transfer coefficients in corrugated plate heat exchanger channel", *Trans. IChemE.*, Vol. 75, Part A, pp. 641-645 (1997).
8. Martin, H.: "A theoretical approach to predict the performance of chevron -type plate heat exchangers", *Chemical Engineering and processing*, Vol. 35, pp. 301-310 (1996).
9. Stasiek, J., Collins, M.W., Clofalo, M. and Chew, P.E.: "Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages-I Experimental results", *J. Heat Mass Transfer* Vol. 39, No. 1, pp. 149-164 (1996).
10. 김예용: "액정을 이용한 열전달 측정방법에서의 측정 오차를 줄이기 위한 연구", 부산대학교 석사학위논문 (1995).
11. 이동근: "판형열교환기의 압력강하 및 열전달특성에 관한 실험적 연구", 연세대학교 석사 학위논문 (1997).
12. 류해성: "판형열교환기", *대한기계학회지*, Vol. 35, No. 9 pp. 794-804 (1995).
13. Holger Martin: "Heat Exchangers", Hemisphere publishing corp., pp. 60-72 (1997).
14. 서현석, 윤석만, 김종보, 서태범, 천원기: "주름형상 판형열교환기 채널에서의 열전달 특성에 관한 연구", *공기조화 냉동공학회 98동계학술발표회 논문집*, pp. 724-729 (1998).
15. Stasiek, J., Mikielewicz, D., Mikielewicz, J. and Collins, M.W.: "A new method of heat transfer coefficient measurements by liquid crystal and digital processing", *Trans IChemE.* vol. 75, part A. pp. 657-662 (1997).
16. Simonich, J.C. and Moffat, R.J.: "Liquid Crystal Visualization of Surface Heat Transfer on a Concavely Curved Turbulent Boundary Layer", *Trans. of the ASME, J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 619-627 (1984).
17. Hippensteele, S.A. Russeel, L.M. and Stepka, F.S.: "Evaluation of a Method for Heat Transfer Measurements and Thermal Visualization Using a Composite of a Heat Element and Liquid Crystals", *Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 184-189 (1983).