

Lumped Capacitance 방법을 이용한 환-관 열교환기의 정량적 국소 대류 열전달 해석을 위한 실험적 연구

김예용* · 김귀순** · 정규하***

(2000년 6월 12일 접수)

An Experimental Study on Quantitative Interpretation of Local Convective Heat Transfer for the Fin and Tube Heat Exchanger Using Lumped Capacitance Method

Ye Yong Kim, Kui Soon Kim and Kyu Ha Jung

Key Words: Fin and Tube Heat Exchanger(환-관 열교환기), Lumped Capacitance Method(집중 용량법), Bi(Biot 수), Liquid Crystal(액정), Convection Heat Transfer(대류열전달)

Abstract

An experimental study has been performed to investigate the heat transfer characteristics of fin and tube heat exchanger. The existing transient and steady methods are very difficult to apply for the measurements of heat transfer coefficients of a thin heat transfer model. In this study the lumped capacitance method was adopted. The heat transfer coefficients were measured by using the lumped capacitance method based on the liquid crystal thermography. The method is validated through impinging jet and flat plate flow experiments. The two experiments showed that the results of the lumped capacitance method with polycarbonate model showed very good agreements with those of the transient method with acryl model. The lumped capacitance method showed similar results regardless of the thickness of polycarbonate model. The method was also applied for the heat transfer coefficient measurements of a fin and tube heat exchanger. The quantitative heat transfer coefficients of the plate fin were successfully obtained. As the frontal velocity increased, the heat transfer coefficients were increased, but the color-band shape showed similar patterns regardless of frontal velocity.

기호설명

Bi : Biot 수, $\frac{hL}{k}$
 c : 비열 [J/kg · K]
 CCD : Charge Coupled Device
 D : 원형분류 직경 [m]
 h : 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 k : 열전도율 [$W/m \cdot K$]

L : 환 두께의 1/2 [m]
 NTSC : National Television System Committee
 \ddot{q}_w : 열플럭스 [W/m^2]
 Re : Reynolds 수, $\frac{UD}{\nu}$
 RGB : Red, Green, Blue
 t : 시간 [sec]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]

* 부산대학교 항공우주공학과

** 회원, 부산대학교 항공우주공학과

E-mail : kuisoon@hanmail.net

TEL : (051)510-2436 FAX : (051)513-3760

*** 삼성전자

그리스문자

$\beta = h\sqrt{t}/\sqrt{\rho ck}$: 무차원화된 시간
 $\theta = (T_w - T_i)/(T_{ref} - T_i)$: 정규화된 온도
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

c	: 특성값
i	: 초기 조건
ref	: 기준값
w	: 벽면 조건

1. 서론

유한한 에너지 자원과 점차로 심각해져 가는 지구의 환경문제를 생각해 볼 때 에너지의 절약과 효율적인 사용이 절실한 상황이다. 그러므로 널리 사용되고 있는 열교환기의 전열성능 향상은 언제나 중요한 연구과제로 남아있다. 이제까지 열교환기의 전열특성 향상을 위해 수도 없이 많은 연구가 수행되었고, 많은 형태의 환이 개발되었다. 그러나 이러한 환의 개발은 대부분 환의 국부 열전달 특성에 관한 충분한 정보가 없는 상태에서 수행되었고, 아직도 환의 국부적인 열전달 특성은 제대로 파악되지 않고 있는 실정이다. 그러므로 보다 나은 열교환기의 개발을 위해서는 환에서의 국소 열전달 현상 파악이 필수적이라 말할 수 있다.

이와 같은 환-관 열교환기의 국부적 열전달 현상을 파악하기 위해 Guannan 등⁽¹⁾은 환-관 열교환기 모델을 2차원과 3차원으로 컴퓨터를 이용하여 열전달 현상 해석을 시도하였다. 그리고 Atkinson 등⁽²⁾은 주름진 환 배열에 대해서 2차원과 3차원으로 수치적 열전달 해석을 시도하였다. Tsai 등⁽³⁾은 2열 평행-관 열교환기의 열전달 특성을 3차원 유한체적법을 이용해 해석하고자 시도하였으며, Jang 등⁽⁴⁾은 파형 환-관 열교환기의 열전달 현상을 3차원 수치적 방법으로 해석하였다. 이와같이 복잡한 형상을 지닌 환-관 열교환기의 국부 열전달 해석은 주로 수치해석 방법에 국한되어 있다.

실험적인 방법으로는 Wang 등⁽⁵⁾이 주름진 환-관 열교환기의 열전달 및 마찰 특성을 규명하였고, Critoph 등⁽⁶⁾이 방사가열 방법으로 평행-관 열교환기의 국부 열전달 현상을 과도방법과 정상방법 두가지 방법으로 액정을 이용하여 실험적 연구를 수행한 바 있다. 그리고 Yun 등⁽⁷⁾은 단속적 표면을 지닌 다양한 형상의 환-관 열교환기의 열전달 특성을 원형환과 확대모델을 이용하여 실험적으로 고찰하였다. 그러나 이들 실험적 연구들

은 열교환기 입구와 출구의 정보를 통한 평균 열전달 현상 파악을 위한 연구이거나 정성적인 국부 열전달 성능해석에 국한되고 있다.

이 이유는 기존의 열전달 측정방법들이 열교환기 환과 같이 복잡하고 얇은 열전달 모델에 적용하기에는 부적합하기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 lumped capacitance 방법(LCM)⁽⁸⁾을 얇은 열전달 모델에 대한 열전달 측정 방법으로 제시하였다. 먼저 이 방법이 열전달 계수 측정용으로 적합한지 확인하기 위해 충돌분류와 평판유동에 대한 기존 방법과의 비교실험을 수행하였다. 그리고 열교환기 환에 대한 적용 가능성을 살펴보기 위해 환-관 열교환기 모델에 대한 실험을 수행하여 환의 국부 열전달 특성을 고찰하였다.

2. 액정을 이용한 온도 측정

열전달 계수 측정을 위해서는 정확한 벽면 온도의 측정이 필수적이다. 본 연구에서는 유동의 교란 가능성이 없고 온도 변화에 민감하게 반응하는 액정을 이용하여 벽면온도를 측정한다. 액정은 물질이라기보다는 물질의 상태를 말한다. 액정상을 가지는 유기물질들은 두개의 뚜렷한 용융점을 가진다. 첫번째와 두번째 용융점 사이의 뿌우연 액체 상태를 액정 상태라 부르는데, 이 상태는 물리적으로는 액체의 성질을 가지고 있으나 다른 액체와는 달리 방향성을 가진 결정 조직을 가진다. 이 결정 조직은 고체 결정과 유사한 광학적 성질을 가지는데, 이 성질로 인해 온도에 따라 다양한 색상을 보이게 된다. 이 색상 반응은 정확하게 같은 온도에서 같은 색상이 재현되므로 온도에 민감한 액정의 다양한 색상 변화가 온도지시계로 이용될 수 있다.⁽⁹⁾ 이러한 온도 변화에 대한 액정의 색상 반응은 5-50 milliseconds로 매우 빨라서 비정상 열전달 해석에 사용될 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이러한 특성으로 인해, 열전달 모델상의 한 점의 온도는 바로 그 점에서 보여지는 색의 색상값과 관계된다. 즉, 색상, 순도, 명도의 세 가지 색의 정의는 액정이 칠해진 어떤 표면의 대류 열전달 연구에 쓰이는 영상처리시스템에 있어서 매우 편리하고도 알맞은 것이다. 왜냐하면 색은 빛에너지의 주파수 특성에 의해 좌우되고, 색상, 순도, 명도 등은 그 주파수 특성들을 나타내는 척도이기 때문이다. 여기서 색상은 빛의 지배적

인 주파수에 의해 결정되는 값이다. 그리고 액정은 온도에 따라 특정한 주파수의 빛을 반사하는 특성이 있으므로 액정 영상과 온도 사이에 직접적인 관계가 있다.

액정 영상과 온도 사이의 직접적인 관계를 알아보기 위한 보정 실험은 다음과 같이 이루어진다. 먼저, 열전달 모델 영상은 고감도 칼라 CCD 감지기를 가진 카메라(Panasonic, WV-CL320)를 이용하여 RGB 정보를 포함하고 있는 액정 표면의 영상으로 획득된다. 이 카메라는 액정이 칠해진 반대편에 열전달 표면에 수직하게 위치시킨다. 이렇게 함으로써 CCD 카메라와 열전달 표면 사이의 장애물이 없어지므로 정확한 색상 측정이 가능하게 된다. 그리고 선명한 액정영상을 얻기 위해 필요한 광원은 카메라 방향에 나란히 위치시킨다. 이는 열전달 표면과 CCD 카메라가 수직을 유지하면서 광원과 CCD 카메라가 근접할수록 색상과 온도와의 관계가 선형성을 유지하고 분산 오차도 작아진다는 김예용 등⁽¹¹⁾의 연구 결과에 따른 것이다. CCD 카메라에서 받아들인 NTSC 신호는 영상처리장치(Data Translation, DT2871)를 거쳐 컴퓨터에서 RGB/HSI 정보로 변환되어 본 연구에서 필요한 색상값(hue)을 얻게 된다.

색상값은 RGB신호로부터 변환될 수 있으며, 색상값과 온도와의 관계 규명을 위해서 액정이 칠해진 면에 얇은 박판 형태의 열전대(Omega, CO2-K)를 부착하여 표면 온도를 측정하는데, 그 결과는 온도지시계(Omega, DP41-TC)에 나타나 액정 영상과 함께 카메라에 포착된다. 이렇게 함으로써 열전대 위치의 색상과 열전대로 측정된 온도를 비교할 수 있게 된다. 이러한 방법으로 Chiral-Nematic 액정(Hallcrest, BM/-R35C1W)에 대한 색상과 온도와의 관계를 보면 Fig. 1과 같다. 이 그림에서 보면 hue 값은 35.3°C와 36.3°C 사이에서 온도와 거의 선형적인 관계를 나타내고 있다. 이는 색상 값이 온도지시계로 훌륭하게 사용될 수 있음을 말해 준다.

3. Lumped Capacitance 방법의 검증

본 논문에서 열전달 측정은 액정을 이용하여 수행하는데, 액정을 이용한 열전달 계수 측정 방법은 일반적으로 크게 두 가지로 분류할 수가 있

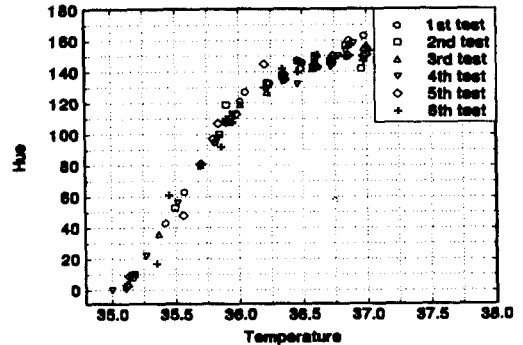


Fig. 1 Hue versus temperature relation

다. 과도(transient) 방법과 정상(steady) 방법이 그것이며, 대류 열전달 계수(h)는 다음과 같이 정의된다.

$$h = \frac{\ddot{q}_w}{T_w - T_{ref}} \quad (1)$$

3.1 과도 방법

과도방법은 열플럭스를 측정하는 대신 비정상 열전달 모델을 설정하여 벽면온도와 시간을 측정하여 열전달 계수를 구하는 방법으로서, Schultz & Jones⁽¹²⁾에 의해 시도되었고, 많은 연구자들이 적용하고 있다.⁽¹³⁾ 열전달 모델을 열전도도가 낮은 물질로 사용할 때 갑작스런 온도 변화가 벽표면에서 발생하면 순간적으로 벽표면 부근에서 온도기울기는 수직한 방향으로 아주 큰 값을 가진다. 이 때 다른 방향의 열전달 크기는 수직한 방향에 비해 상대적으로 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러므로 열전달 모델내에서는 1차원 비정상 전도방정식에 따라 열전달이 이루어진다. 이와 같은 열전달 모델 내부에서의 1차원 열전달 조건을 만족하기 위해서 열전달 모델은 열전도도가 아주 낮은 물질이어야하고 두께가 두꺼워야 된다. 본 연구에서 사용할 열교환기 흰은 열전도도는 상대적으로 낮지만, 두께가 아주 얇은 관계로 과도방법을 이용하기에는 적합하지 않은 면이 있다.

3.2 정상 방법

두번째 방법인 정상 방법은 열전달 표면에 일정한 \ddot{q}_w 를 공급하여 열전달 계수를 측정하는

방법으로 Baughn 등⁽¹⁴⁾에 의해 시도되었고, 다수의 연구자들에 의해 적용되고 있다.^(15,16) 일정한 \ddot{q}_w 를 공급하기 위해서는 흔히 금박막 필름을 사용한다. 금박막 필름은 모양이 정방형이기만 하면 균일한 열플럭스를 내는 필름이며, 직류 전원공급기로 전원 공급을 한다. 그러므로 단위 면적당 발생하는 열플럭스는 금박막 필름에 공급된 전력을 금박막 필름의 면적으로 나누어서 구한다. 금박막 필름 위에 뿌려진 액정에 의해 나타난 영상의 색상은 색상 획득 방법⁽⁹⁾을 통해서 표면온도로 환산될 수 있다. 이렇게 되면 식 (1)에서 우변에 있는 모든 변수를 알게 되므로 열전달 계수의 계산이 가능해진다. 결국, 정상방법을 이용한 실험의 성공여부는 금박막 필름의 열플럭스 균일도에 있다고 할 수 있다. 하지만 본 실험에 사용될 열교환기 환은 전체적인 형상이 환에 관이 관통하는 형상이고 대부분의 환은 슬릿을 가진 복잡한 형상이기 때문에 금박막 필름을 표면에 부착하는 것이 어렵고 부착을 하더라도 균일한 열플럭스가 보장되지 않는다. 이런 이유로 금박막 필름을 이용한 정상방법 역시 본 논문에서 다루고자하는 열교환기 환에 적용하는 데 적합하지 않음을 알 수 있다.

3.3 Lumped Capacitance 방법

열교환기 환과 같이 얇고 복잡한 모델에서 기존의 방법으로 열전달계수를 측정하는 것은 쉽지 않다. 이러한 경우 열전달 표면 근처에서 온도기울기가 심하다고 볼 수 없으며 오히려 환 내부에서는 온도가 거의 일정하다고 볼 수 있다. 그러므로 환 내부에서는 온도가 균일하다는 가정 하에서 과도 해석을 수행하는 lumped capacitance method(이하 LCM)를 적용하는 것이 타당하다. LCM에 의거한 열전달 계수에 대한 식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$h = \frac{\rho L_c c}{t} \ln \frac{T_i - T_{ref}}{T_w - T_{ref}} \quad (2)$$

이 식에 의하면 과도상태하에서 시간에 따른 벽면온도(T_w)의 측정으로 열전달계수를 구할 수 있다.

그러나 이 방법은 대류열전달 계수의 측정방법으로 사용되어 검증된 바가 없다. 이에 따라 본

연구에서는 먼저 LCM의 검증을 위해 잘 알려지지 않고 널리 사용되는 과도 방법과 비교하기 위한 두가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 물리적으로나 정량적으로 그 결과가 잘 알려져 있는 충돌분류 실험이고 나머지 하나는 실제 열교환기 실험에 장착될 환과 동일한 물리적 조건에서 이루어진 실험이다. 두 실험 모두 LCM에서는 열전달 모델로 폴리카보네이트를 이용하였으며, 결과는 기존의 아크릴을 이용한 과도 방법과 결과를 비교하였다. LCM 실험에서는 폴리카보네이트 두께를 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 표면 온도 산출은 액정(R35C1W, Fig. 1)을 이용한 색상 획득 방법을 이용하였다.

열전달 모델 재료인 폴리카보네이트의 물성치는 다음과 같다.

- 열전도도 : $k = 0.1925927 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- 밀도 : $\rho = 1,300.0 \text{ kg/m}^3$
- 비열 : $c = 1,350.0 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

이 값들은 순수한 폴리카보네이트의 물성치가 아니라, 액정과 검정페인트가 도포된 상태의 모델 재료를 한국표준과학연구소(KRISS)에 의뢰하여 측정된 값이다. 밀도 측정을 위해 한국표준과학 연구소에 두께측정을 의뢰하고(요오드 안정화 헬륨-네온 레이저에 의해 중심주파수가 교정된 간섭계(KRISS)를 이용), 질량은 1.0×10^{-5} 의 정밀도를 가진 전자저울(OHAUS, AP210S)로 측정하였으며, 비열 역시 한국표준과학연구소에 의뢰하여(DSC 장치(KRISS)를 이용하여 SRM 720 Sapphire($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)와 비교 측정) 온도별로 비열을 측정된 값이다. 이와 같이 구해진 물성치에 의거하여, 본 연구에서 환 두께가 가장 두꺼운 0.5mm 폴리카보네이트의 Bi는

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{45 \times 0.25 \times 10^{-3}}{0.1925927} = 0.058$$

정도이다. 이는 LCM을 적용할 수 있는 Bi의 상한인 0.1보다 작으므로 LCM 적용이 가능함을 알 수 있다.⁽⁸⁾

LCM의 검증을 위한 첫째 실험은 잘 알려진 충돌분류에 대한 비교실험이다. 과도방법의 실험구성은 Fig. 2에 LCM의 실험구성은 Fig. 3에 나타

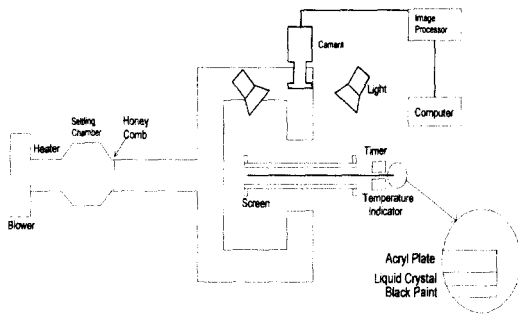


Fig. 2 Experimental setup 1 with Acryl for transient method

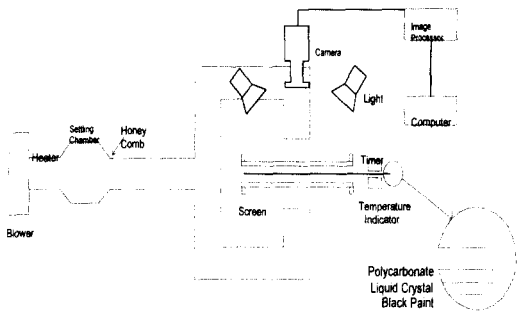


Fig. 3 Experimental setup 1 with Polycarbonate for verification of LCM

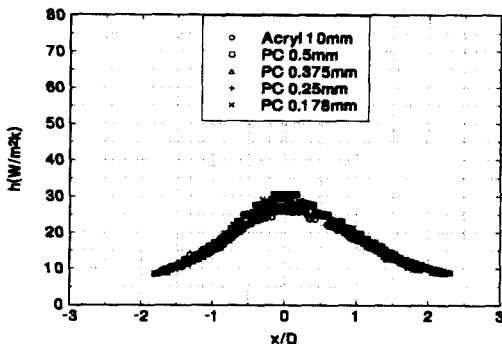


Fig. 4 Results of experiment 1

나 있다. 과도방법과 LCM에서 동일한 실험조건을 구현하기 위해 열전달 모델을 제외한 나머지는 동일한 장치를 사용하는데, 두 방법 모두 기존의 단일분류를 분기시켜서 2개의 분류를 만들었고, 분류출구와 열전달 표면까지의 거리는 분류 직경(70mm)의 4배 거리이다. 양쪽분류의 출구 속도는 4.7m/s로 동일하고 온도도 동일한 상태에서 실험을 수행하였다. 열전달 모델은 과도방법에서는 두께가 10mm인 아크릴 판을, LCM에서는 두께가 0.178, 0.25, 0.375, 0.5mm로 서로 다른 폴리카보네이트 판을 사용하였다. 과도방법과 LCM 모두 실험은 가열된 분류유동이 충분히 발달된 상태에서 실험모델 전방에 위치한 스크린을 제거함으로써 시작되고, 이러한 과도상태하에서 시간에 따른 온도를 측정하여 열전달 계수를 얻게 된다. 이 때 시간은 타이머(LG, SZL-WL)로, 온도 정보는 액정의 영상을 처리하여 얻는다.

실험결과는 Fig. 4에 나타내었는데, 모든 결과가 정체점에서 최대값을 보이고 반경방향으로 나갈수록 작아지는 전형적인 충돌분류의 특성을 잘 나타내고 있다. 그리고 폴리카보네이트의 두께에 상관없이 LCM의 결과가 열전달 계수의 측정방법으로 널리 사용되는 과도 방법의 결과와 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. 이는 본 실험과 같이 Bi가 0.058보다 작은 조건에서는 LCM이 대류 열전달 계수 측정에 적합한 방법이 될 수 있다는 것을 말한다.

LCM의 검증을 위한 두 번째 실험은 분류에 평행한 방향으로 평판을 위치시켰을 때의 비교실험이다. 이 때 평판은 실제 열교환기 평판과 유사한 조건으로 특성길이를 76mm로 설정하였다. 이를 위한 실험 구성은 과도방법은 Fig. 5에 LCM은 Fig. 6에 나타내었다. 두가지 방법의 실험에서 열유동 조건은 동일하게 유지하였는데, 열전달 모델은 분류직경의 10배에 해당하는 위치에 위치시켰고, 분류 출구속도는 10.7m/s로 유지하였다.

결과는 Fig. 7에 나타내었는데, 모든 결과가 경계층이 성장하면서 열전달 계수가 점점 감소하는 과정을 잘 나타내고 있다. 그리고 첫째 실험과 마찬가지로 과도 방법과 LCM이 거의 같은 결과를 보이고 있으며, LCM에서는 폴리카보네이트의 두께에 상관없이 동일한 결과를 나타내고 있다.

이와 같이 LCM의 결과가 기존에 잘 알려진 과

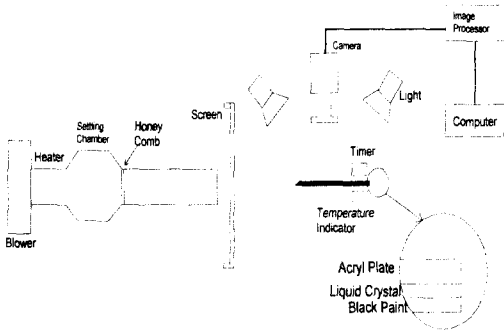


Fig. 5 Experimental setup 2 with Acryl for transient method

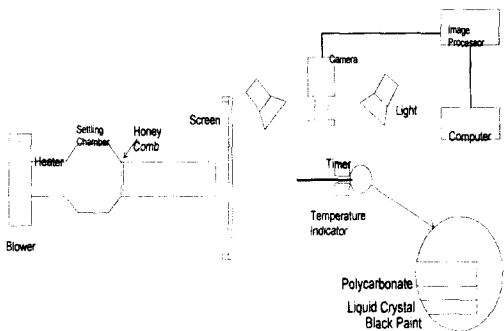


Fig. 6 Experimental setup 2 with Polycarbonate for verification of LCM

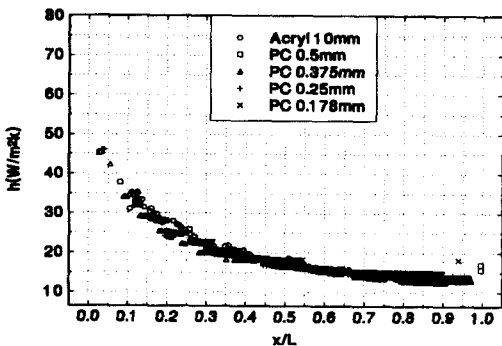


Fig. 7 Results of experiment 2

도방법의 결과와 잘 일치한다는 사실은 LCM이 얇은 박판 형태의 열전달 모델에 혹은 Bi가 작은 열전달 모델에 적용될 때 결과에 대한 신뢰성이 확보됨을 말해준다. 특히 기존의 방법으로는 측정이 어려운 열교환기 환과 같이 얇은 박판의 열전달 성능해석에 LCM이 사용될 수 있다는 것을 나타낸다.

4. LCM을 이용한 평판의 열전달 특성 실험

4.1 실험 장치 및 방법

본 장에서는 검증된 LCM을 가정용 에어컨 환의 국부 대류열전달 해석에 적용해 보았다. 본 논문에 있어서 열교환기 환의 모델은 제작의 용이성과 측정의 정확성을 위해 원형모델의 3배의 크기로 제작하였으며, 원형모델의 속도조건이 1.0-1.5m/s이므로 확대모델이 같은 Re 조건을 가지기 위해서는 약 0.3~0.5m/s의 속도가 요구된다.

Fig. 8은 이러한 속도조건에서 운용되도록 제작된 저속풍동의 개요도이다. 그림에서 보는 바와 같이 풍동의 형태는 흡입개방형으로서 두 개의 정체실, 수축부, 시험부 및 팬으로 구성되어 있다. 유동은 제 1 정체실을 통과하여 하니콤 및 3장의 스크린을 거치면서 정류되고 시험부(열교환기)로 들어가게 된다. 시험부를 지난 유동은 제 2 정체실에서 유동속도를 측정하기 위한 노즐부를 통과하여 팬을 거쳐 외부로 배출된다. 시험부에서의 속도범위는 0.2~0.8m/s로서 일반적인 유속측정장치로는 계측이 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위해서 노즐형 유량 측정을 응용하여 제 2 정체실에 타원형노즐을 설치하고 그 출구에서의 속도를 측정한 후 유량에 대한 교정곡선을 구한 다음 시험부에서의 속도로 환산하게 된다. 여기서 노즐 출구에서의 최고유속은 약 27m/s이고 피토투브와 디지털 마노미터(FCO12)를 이용하여 측정된다.

LCM의 실험 성공 여부는 정확한 온도 측정과 아울러 유동온도가 스텝 함수로 주어지게 실험을 수행하느냐에도 달려 있다. 그리고 열전달 모델의 초기 온도를 얼마나 균일하게 유지시켜서 순간적으로 유동에 노출시키느냐의 여부 또한 중요한 요소이다. 이러한 점을 고려하여 LCM 실험을 위한 시험부는 Fig. 9와 같이 구성하였다. Fig. 10

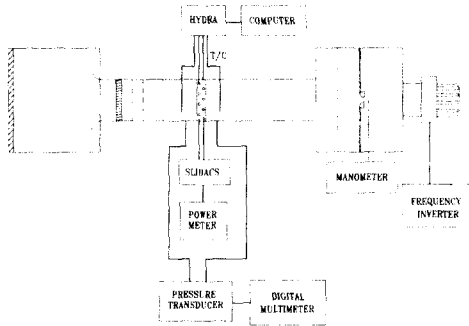


Fig. 8 Detail view of wind tunnel

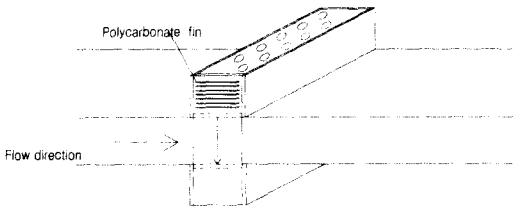


Fig. 9 Schematic of experimental setup

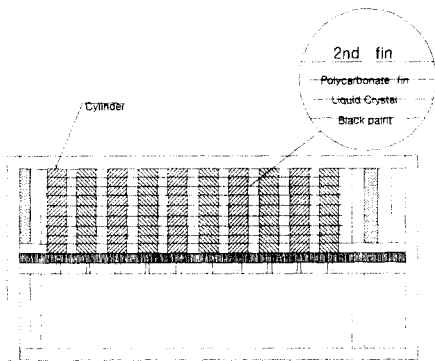


Fig. 10 Detail view of heat transfer model

에는 시험부의 냉각 환이 장착된 열전달 모델이 좀 더 자세하게 나타나 있다. Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 바와 같이 열교환기 환이 설치된 부분의 유동통로와 같은 유동통로 면적을 가진 가상통로

를 하나 더 만든다. 이 열전달 모델을 항온조 속에 장시간(5시간 정도) 동안 넣어서 전체적으로 온도가 일정하게 유지되도록 한다. 그리고는 이 열전달 모델을 짧은 시간안에 풍동의 시험 단면 부분에 장착한다. 장착할 때 열교환기 환이 장착된 유동통로 부분이 주위공기에 노출되므로 열전달 모델과 함께 가열해 두었던 스티로폼으로 이 유동통로를 막고 시험 단면까지 이동한다. 짧은 시간 안에 스티로폼 커버를 제거함과 동시에 시험 단면에 장착한다. 물론 시험 단면은 이미 단열처리가 되어 있는 상태이다. 이런 방법으로 장착이 끝난 뒤 열전달 계수 측정시까지 열전달 모델에 노출되게 될 유동은 가상 통로로 흐르게 된다. 이렇게 함으로서 열전달 모델이 갑자기 유동통로에 노출될 때 유동의 교란을 최소화 할 수 있다.

그리고는 가능한 빠른 시간 내에 열전달 모델을 유동통로에 노출시킨다. 유동은 가상통로로 흐르고 열전달 환이 장착된 열전달 모델이 순간적으로 위에서 아래로 삽입되는 방법으로 유동에 노출되는 것이다. 열전달 모델이 유동에 노출되기 직전에 열전달 모델의 초기 온도를 체크하는데, 여기서 말하는 초기온도는 열전달 모델의 윗면에 미세한 구멍을 내어 열전대로 측정된 온도값이다. 항온조속에 장시간동안 넣어서 보온시킨다는 의미 자체가 열전달 모델이 전체적으로 균일한 온도를 유지한다는 가정하에서이기 때문에 한 점에서 측정된 온도를 초기 온도값으로 가정하고 실험을 수행한다. 열전달 모델이 순간적으로 유동 통로에 노출되는 순간 일정한 온도로 가열되어 있던 열전달 모델은 냉각되기 시작하는데, 이 때부터 타이머가 작동되어서 3CCD 카메라를 거쳐 컴퓨터에 열전달 모델의 칼라 영상과 시간이 동시에 저장된다. 저장된 영상들을 시간순으로 재생시켜서 색상과 온도와의 보정 결과를 토대로한 표면온도와 시간정보를 이용하여 열전달 계수를 구해 나간다. 다른 시간에 획득한 각각의 영상에서 계산된 열전달 계수를 최종적으로는 합성하여 열전달 모델 표면 전체의 열전달 계수를 알아낼 수 있다.

실험은 평판환에 대해 수행하였으며, 모두 7개의 열교환기 환을 10개의 실린더형태의 관과 결합시키는데, 환과 환 사이에는 둥근 링을 끼워서 각 환 사이의 간격을 일정하게 하였다. 관 직경

은 22.5mm, 관단 피치는 63mm, 관열 피치는 38.1mm이며, 흰 피치는 4.5mm이다. 열전달 연구가 수행될 흰의 수직 위치에 대한 고찰을 하기 위해서, 액정이 도포된 열교환기 흰을 위쪽에서부터(카메라의 위치에서 가장 가까운 방향에서부터) 위치시켜 보았다. 다시 말해 제일 윗면, 두 번째면, 세 번째면 순으로 액정(R35C2W)을 도포한 흰을 위치시켜서 냉각실험을 해 보았다. 그 결과 제일 윗면에 위치시켰을 때 열교환기 흰 표면에서 액정 영상이 훨씬 늦은 시간에 나타나는 것을 확인하였는데, 이는 제일 윗면에 설치한 경우는 다른 경우보다 열전달 계수가 매우 작다는 것을 의미한다. 상당한 시간이 지나도 액정영상의 변화가 보이지 않기에 흰을 제일 위에 위치시키는 경우에는 정확한 흰과 흰사이의 열전달 현상을 보기에 무리가 있음을 알 수 있었다. 그러나 두 번째와 세 번째의 경우는 같은 액정영상이 거의 같은 시간대에 나타나므로 열전달 계수가 거의 유사함을 알 수 있다. 이와 같이 두 번째와 세 번째 위치에서는 두 경우의 열전달 현상에서 두드러진 차이가 없었고, 세 번째 위치보다는 두 번째 위치에서 색상이 더 선명하게 획득되므로 이후 실험을 모두 두 번째 위치에 액정을 바른 흰을 위치시킨 후 수행하였다.

LCM에 사용한 액정은 R35C2W로서, 35°C에서 빨간색을 보이다가 37°C에서 보라색이 끝날 때까지 색상변화를 하는 액정이다. 색상값과 온도와의 관계는 Fig. 11에 나타난 바와 같고, 영상들에서 보면 검정색과 파란색이 경계를 이루므로, 이 띠를 추적하여 온도 정보를 획득하였다. Fig. 11에서 보면 이 색상의 경계에 해당하는 색상값이 35.5°C의 온도를 나타내므로, 이 색상 경계의 온도를 식 (2)의 벽면 온도항에 대입하여 열전달 계수를 산출하였다. 이 실험은 냉각 과정이므로 먼저 색상이 나타나는 부분이 큰 열전달 계수 값을 가지고 늦게 색상이 나타나는 부분은 상대적으로 작은 열전달 계수 값을 가지게 된다.

4.2 실험 결과 및 고찰

평면에 대해 LCM 실험을 수행하여 획득한 영상들 중 대표적인 영상 3개를 Fig. 12에 나타내어 보았다. 이 실험은 모델 전면풍속이 0.3m/s이고, 유동의 자유흐름온도는 17.5°C이며, 실험 초기 온도가 60.06°C인 상태에서 수행되었다. 열전달 모

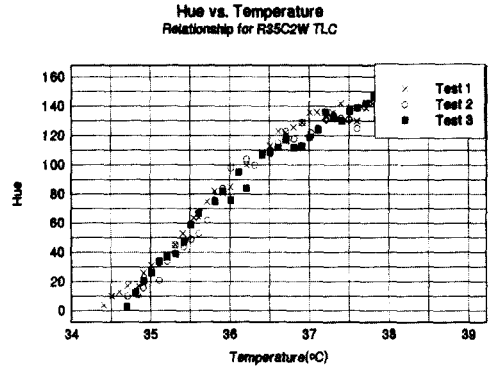


Fig. 11 Hue versus temperature relation for R35C2W

델이 갑자기 유체 통로에 노출되면 초기에 흰표면은 모두 검은색을 띠고 있다가 냉각이 진행되면서 실험시작 12.6초 후에 열전달 계수가 커져 가장 빨리 냉각되는 흰 전반부에 푸른색이 나타나기 시작한다. 그리고 시간이 지나면서 흰이 더 냉각되어 온도가 낮아짐에 따라 푸른색이 후반부로 이동하고 녹색, 노랑, 빨강 등의 색상이 차례로 나타나게 된다. 이 액정의 영상은 실험이 진행되는 동안 냉각이 계속 진행되므로 후반부로 점점 이동하게 된다. 이러한 시간에 따른 색상의 변화는 열전달 특성을 나타내는데, 색상이 먼저 나타나는 전반부가 냉각이 잘 되고 색상이 늦게 나타나는 후반부로 갈수록 냉각이 잘 되지 않는다는 것을 의미한다.

본 실험에서는 획득한 영상들 중에서 7개의 영상과 각 영상에 해당되는 시간을 동시에 저장하여 열전달 계수의 분포를 살펴보았다. Fig. 12(a)는 7개의 영상 중 둘째에 해당하는 실험시작 16.6초 후의 실제 액정영상을 나타내고 있다. 이 그림에서 나타난 경계는 같은 열전달 계수를 의미하는데 해당되는 시간 16.6초와 경계면의 온도 값 35.5°C를 식 (2)에 대입하면 $13.75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 의 열전달 계수 값을 얻게 된다. 이 경계면의 전반부는 액정의 영상이 먼저 나타나므로 이보다 큰 열전달 계수 값을 가지고 후반부는 액정의 영상이 나중에 나타나므로 이보다 작은 열전달 계수 값을 가진다고 말할 수 있다. 이와 같이 일정한 열전달 계수 값을 가지는 색상의 경계는 흰 전반부에 유동 진행방향에 수직한 방향으로 띠를 형성하고 있는데, 관 주변에 비해 관과 관 사이의

중간 부위가 뒤로 처지는 형상을 하고 있다. 이는 관과 관 사이의 중간 부위가 관 주변에 비해 높은 열전달 계수를 가진다는 것을 의미하며, 중간부위의 빠른 유동속도가 이러한 높은 열전달 계수를 유발한다고 볼 수 있다.

Fig. 12(b)는 7개의 영상 중 넷째에 해당하는 실험시작 27.4초 후의 실제 액정영상을 나타내고 있다. 이 그림에서 나타난 색상의 경계는 실험시작 16.6초 후의 영상인 Fig. 12(a)의 영상에 비해 대체적으로 경계가 후반부에 위치하게 되지만, 관 주변에서는 경계의 위치가 크게 변하지 않고 관을 감싸고 있다. 이 영상의 색상경계에 대한 열전달 계수 값을 해당되는 시간 27.4초와 경계면의 온도값 35.5°C를 식 (2)에 대입하여 구한 결과는 $8.33\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다.

Fig. 12(c)는 7개의 영상 중 여섯째에 해당하는 실험시작 39.3초 후의 실제 액정영상을 나타내고 있다. 이 그림에서 나타난 색상의 경계는 실험시작 27.4초 후의 영상인 Fig. 12(b)의 영상에 비해 경계가 더 후반부로 내려가 관들 사이로 확대되어 나가는 것을 보이고 있다. 색상의 경계는 전방의 관 앞에서 출발하여 관을 따라 돌다가 뒤로 처지게 되며, 후방의 관을 만나게 되면서 다시 관 주위로 따라 도는 형태를 취하고 있다. 이 영상의 색상경계에 대한 열전달 계수 값을 해당되는 시간 39.3초와 경계면의 온도값 35.5°C를 식 (2)에 대입하여 구한 결과는 $5.81\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다.

Fig. 13은 위와 같은 방법으로 평환에 대한 7개의 영상자료로부터 구한 열전달 계수 값의 분포를 나타내어 보았다. 여기서 보면 환의 전반부에서 냉각이 잘 되어 비교적 큰 열전달 계수를 나

타내는 반면, 후반부로 갈수록 냉각이 느리게 진행되어 작은 열전달 계수를 나타냄을 알 수 있으며, 관 주위보다 유체 속도가 빠른 유체통로에서 높은 열전달 계수를 나타내고 있다. 그리고 열전달 계수 값이 $18.12\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 보다 큰 영역이 존재하는 반면에 관 후류 영역에서는 $5.03\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 보다 작은 값을 가지게 된다.

Fig. 14에는 모델 전면풍속의 변화에 따른 열전달 특성 변화에 대해 고찰해보기 위해, 모델 전면풍속이 0.6m/s인 경우에 대한 평환의 실험에서 획득한 영상들을 나타내 보았고, 열전달 계수는 Fig. 15에 나타내었다. 자유흐름온도는 25.8°C이고 실험 초기온도는 55°C이다. Fig. 12와 Fig. 14에서 알 수 있듯이, 전면풍속이 변화해도 색상 띠가 진전해 나가는 경향에 있어서는 거의 차이가 없으며, Fig. 15에 나타나 있듯이 단지 열전달 계수

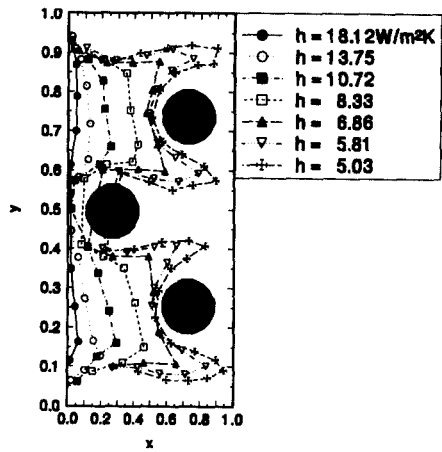
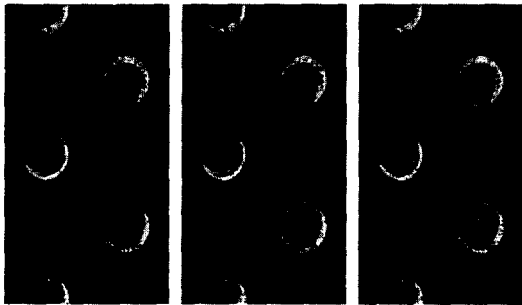


Fig. 13 Heat transfer coefficient distribution map for plate fin (Frontal velocity = 0.3m/s)



(a) After 16.6s (b) After 27.4s (c) After 39.3s
Fig. 12 Real images for plate fin (Frontal velocity = 0.3m/s)



(a) After 7.3s (b) After 15.7s (c) After 23.8s
Fig. 14 Real images for plate fin (Frontal velocity = 0.6m/s)

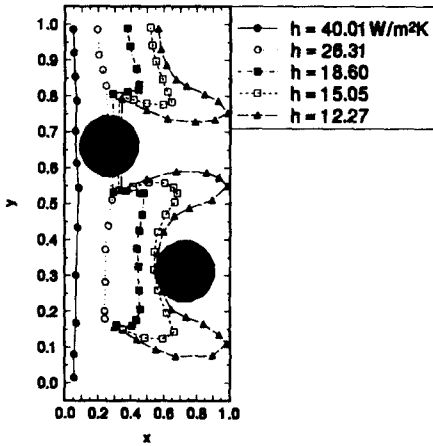


Fig. 15 Heat transfer coefficient distribution map for plate fin (Frontal velocity = 0.6m/s)

Table 1 Uncertainty analysis

$\frac{\delta\rho}{\rho}$	0.7%
$\frac{\delta L_c}{L_c}$	0.7%
$\frac{\delta c}{c}$	2.0%
$\frac{\delta t}{t}$	0.2%
$\frac{\delta(T_i - T_\infty)}{(T_i - T_{ref})}$	0.4%
$\frac{\delta(T - T_\infty)}{(T - T_\infty)}$	1.4%
$\frac{\delta h}{h} = [(\frac{\delta\rho}{\rho})^2 + (\frac{\delta L_c}{L_c})^2 + (\frac{\delta c}{c})^2 + (\frac{\delta t}{t})^2 + (\frac{\delta(T_i - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)})^2 + (\frac{\delta(T - T_\infty)}{(T - T_\infty)})^2]^{1/2}$	2.6%

의 절대값이 차이가 난다. 모델 전면풍속이 빨라져 열전달 계수값이 증가함을 보여주고 있고, 열전달 진행모양(색상 띠)이 0.3m/s의 경우와 거의 유사하게 일어남을 알 수 있다.

본 논문에서의 불확실도는 95% 이상의 신뢰도에서 측정 최대오차가 다음과 같고, 열전달계수는 이 오차들의 조합이며, Kline and McClintock⁽¹⁷⁾이 제안한 오차조합 원리를 이용하였다.

5. 결론

열교환기 흰과 같이 복잡하면서도 얇은 박판형

태의 열전달 모델에서 기존의 방법으로는 국부 열전달 계수를 측정하는 것이 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는 LCM을 이용하여 열교환기 흰에 대한 국부 열전달 특성을 실험적으로 고찰해 보았다. 이를 위해 LCM이 열전달 계수 측정용으로 적합한지 확인하기 위해 널리 사용되고 있는 과도방법과 비교하면서 타당성을 확인하였다. 그리고 열교환기 흰에 대한 적용 가능성을 살펴보기 위해 흰-관 열교환기 모델에 대한 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 통해 얻게 된 결론은 다음과 같다.

(1) 충돌분류와 분류에 평행하게 놓인 평판 실험 모두에서 LCM의 결과는 과도방법의 결과와 잘 일치하므로 LCM이 열전달 계수 측정에 적합하다고 할 수 있다.

(2) 폴리카보네이트를 이용한 LCM 결과는 흰 두께에 상관없이 동일한 결과를 나타내므로 LCM은 Bi가 0.058보다 작은 경우의 열전달계수 측정에 적합한 방법이다.

(3) 평흰에 대한 열전달 특성 고찰이 가능함을 확인하였고, 더 복잡한 슬릿을 지닌 흰들에 대한 열전달 해석도 가능하다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야에서 지원받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Guannan Xi, Takeshi E., and Kunikazu T., 1997, "Differences in simulation with Two and Three-Dimensional Models for Finned Tube Heat Exchangers," *Transport Phenomena in Thermal Science and Process Engineering*, Kyoto, Japan : November 30 ~ December 3.
- (2) Atkinson, K. N., Drakulic, R., Heikal, M. R., and Cowell, T. A., 1998, "Two and Three-Dimensional Numerical Models of Flow and Heat Transfer over Louvered Fin Arrays in Compact Heat Exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 4063 ~ 4080.
- (3) Tsai, S. F., and Sheu, T. W. H., 1998, "Some

- Physical Insights into a Two-row Finned Tube Heat Exchanger," *Computer & Fluids*, Vol. 27, No. 1, pp. 29~56.
- (4) Jang, J. Y., and Chen, L. K., 1997, "Numerical Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow in a Three-Dimensional Wavy-Fin and Tube Heat Exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 16, pp. 3981~3990.
- (5) Wang, C. C., Lee, C. J., Chang, C. T., and Lin, S. P., 1999, "Heat Transfer and Friction Correlation for Compact Louvered Fin-and-Tube Heat Exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1945~1956.
- (6) Critoph, R. E., Holland, M. K., and Fisher, M., 1999, "Comparison of Steady State and Transient Methods for Measurement of Local Heat Transfer in Plate Fin-Tube Heat Exchangers using Liquid Crystal Thermography with Radiant Heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1~12.
- (7) Yun, J. Y., and Lee, K. S., 1999, "Investigation of Heat Transfer Characteristics on Various Kinds of Fin-and-Tube Heat Exchangers with Interrupted Surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2375~2385.
- (8) Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1999, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," John Wiley and Sons, Inc.
- (9) Kim, K., 1993, "An Experimental Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Jet," *KSME Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 258~271.
- (10) Hallcrest, (1991), *The HALLCREST Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology*, Hallcrest Co., Glenview, IL.
- (11) 김예용, 김귀순, 1995, "액정을 이용한 열전달 측정 방법에서의 측정 오차를 줄이기 위한 연구," 한국항공우주학회지, 제23권, 제4호, pp. 74~82.
- (12) Schultz, D. L., and Jones, T. V., (1973), "Heat Transfer Measurements in Short Duration Hypersonic Facilities," AGARD-AG-165.
- (13) 김예용, 김귀순, 1999, "과형 충동분류의 열전달 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제23권, 제3호, pp. 320~329.
- (14) Baughn, J. W., Ireland, P. T., Jones, T. V., and Saniei, N., (November 1989) "A Comparison of the Transient and Heated-Coating Methods for the Measurement of Local Heat Transfer Coefficients on a Pin Fin," *Trans. of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 877~881.
- (15) 이대회, 정영석, 김대성, 임경빈, 1997, "볼록한 반구면에 충돌하는 원형제트의 열전달 및 유동특성," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제4호, pp. 579~588.
- (16) 김예용, 정기호, 김귀순, 서태범, 1999, "다중 오리피스 노즐을 이용한 총출분류의 열전달 향상에 관한 실험적 연구," 공기조화 냉동공학 논문집, 제11권, 제5호, pp. 647~657
- (17) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.