



## Navier-Stokes 방정식을 사용한 수평원관상의 LiBr-H<sub>2</sub>O 흡수특성에 대한 연구 Parametric Study on the LiBr-H<sub>2</sub>O Absorption Process on Horizontal Tubes Using Navier-Stokes Equations

°민준기<sup>1)</sup>, 최도형<sup>2)</sup>

J. K. Min and D. H. Choi

The LiBr-H<sub>2</sub>O absorption process on a horizontal tube has been analyzed using the numerical method which incorporates the fully elliptic Navier-Stokes equations for the momentum equations, the energy and mass-diffusion equations. On a staggered grid, the SIMPLER algorithm with the QUICK scheme is used to solve these equations along with the MAC method for the free surface tracking. With the assumption that the absorbent is linear, calculations have been made for various inlet temperature and flow-rate conditions. The detailed results of the parametric study, such as the temperature, concentration, absorption mass flux and wall heat flux distributions are presented. The self-sustained feature of the absorption process is clearly elaborated. The analyses have also been carried out for multiple tube arrangement and the results show that the absorption rate converges after a few tube rows.

### 1. 서론

흡수식 냉동기는 최근의 환경보호주의와 대체연료에 대한 요구의 증대로 그 관심도가 증대되고 있다. 이 흡수식 냉동기의 주요 구성부분인 흡수기는 냉매와 흡수제 사이의 유동 및 열, 물질전달 현상이 복잡하게 얽혀 있어 중요한 연구의 대상이 되고 있다. 이 흡수현상에 대한 기존의 연구는 보통 속도와 액막두께를 유동이 완전히 발달한 경우의 해인 Nusselt[1] 분포로 가정한 후 열 및 물질전달 방정식을 해석하였는데 Grossman[2]은 경사평관상의 액막류에서 무차원화된 온도와 농도가 벽온도 및 평형농도로 접근함을 보였다. Choudhury 등[3]은 원관에 대한 해석으로부터 유량이 큰 경우에는 관의 직경이 커야 흡수성능이 좋아짐을 보였다. Andberg와 Vliet[4] 그리고 박일석과 최도형[5] 등은 온도, 농도 방정식에 운동량 방정식까지 연계시켜 계산하였다. 여기서 사용된 경계층근사에 의한 전진기법은 실제 흡수액막이 매우 얇고 주로 흡수판의 측면 액막에서 흡수현상이 발생하므로 타당하며 빠른 계산시간과 격자수에 거의 제한 받지 않아 효과적이다. 그러나 경계층근사는 표면장력영향이 중요한 상, 하부 정체영역에서는 유효하지 못한 가정이 된다. Min과 Choi[6]는 수평원관상의 액막유동에 대한 Navier-Stokes 해석을 수행하였고 이때 자유표면의 위치를 계산하기 위하여 기존의 MAC 방법[7]을 수정하여 사용하였으며, 표면장력효과에 의해 상하정체점 부근에서 유동양식이 기존의 결과와 매우 다름을 확인하였다. 본 연구에서는 이 방법을 사용하여 구해진 액막유동하에서 여러 가지 입구조건에 따른 흡수현상의 특성을 고찰하였다. 우선 단일원관상에서의 흡수현상을 여러 가지 입구온도와 유량에 따라 비교하였고 여러 관을 지나는 경우의 흡수특성의 변화에 대한 연구도 실시하였다.

### 2. 지배방정식 및 수치해석

Fig. 1에 단일 수평원관상의 흡수액막유동과 그에 대한 경계조건을 표시하였다. 수치해석으로는 Min과 Choi[6]의 방법에서와 같이 2격자계를 사용한 2단계 해석법을 사용하였다. 즉 원관주위에 직교곡선좌표계를 구성하고 액막유동에 대한 비정상 Navier-Stokes 방정식을 계산하며 이 때 자유표면의 위치도 함께 계산한다. 자유표면의 위치는 시간평균이 한 값으로 수렴하면 그 위치를 정상상태위치로 가정하였다. 이렇게 구해진 자유표면에 대해 액막내부에만 비직교 일반좌표계를 구성하여 온도와 농도방정식을 계산하여 흡수현상을 해석하였다.

자유표면에서의 온도와 농도에 대해서는 Fick 법칙과 증기압평형조건을 주게 되는데 이 때 선형

1) 한국과학기술원 기계공학과 대학원

2) 한국과학기술원 기계공학과 (대전시 유성구 구성동 373-1, Tel: (042)869-3018)

흡수제 가정, 즉  $C_s = A_1 T_s + A_2$  인 가정을 사용하였다. 이 증기압 평형조건을 무차원화하면

$$C_s^* = EqT_s^*, \quad Eq = A_1(T_0 - T_w) / (C_0 - C_{we})$$

이고  $T$ 는 온도,  $C$ 는 농도,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 상수, 하첨자 0은 입구,  $w$ 는 관벽,  $e$ 는 평형 그리고 상첨자 \*는 무차원변수를 의미한다. 이 때 새로 정의된 무차원수  $Eq$ 는 입구에서의 평형도를 나타내는 것으로 평형이면 1이고 1보다 작으면 비평형을 의미한다. 다만해석에 대해서는 단일판에서의 흡수 현상을 해석한 결과 나오는 유동출구에서의 온도와 농도를 다시 입구조건으로 하여 하부단을 해석하는 방법을 사용하였다.

수치해석으로는 Patankar[8]가 제시한 엷물림격자계에서의 SIMPLER 알고리즘을 사용하였고 대류항의 차분은 QUICK 도식을 사용하였다. 또한 자유표면의 위치는 기존의 MAC 방법을 곡선좌표계에 맞도록 수정하여 사용하였다.

### 3. 결과 및 토의

계산은 101x71의 비균일 직교격자를 구성하여 시간에 따라 전진하며 자유표면의 위치를 계산한 후, 정상상태에 도달하면 액막내부에 198x45의 비균일 일반격자를 구성하여 사용하였다. 계산에 사용된 물성치와 기하학적조건을 Table 1에 나타내었다. 계산은 입구유량과 입구온도를 바꾸어 가며 수행하였고 이 때 입구농도는 0.612를 주었는데 이 값은 입구온도가 48°C인 경우의 평형농도이다. 이 계산조건에 대한 여러 무차원수를 Table 2에 나타내었다.

Rogers 와 Goindi[9]는 수평원관상 액막류에 의한 냉각문제를 실험하였는데 Fig. 2에는 벽에서의 열전달계수를 본 계산과 비교하였다. 여기서 실험치는 매 45° 구간에서 측정된 열유량값을 선형으로 보간한 값과 매 15°구간마다 측정된 관 벽에서의 온도를 사용하여 bulk 온도를 근사한 후 구한 오차가 포함된 열전달 계수이다. 이에 따라 본 계산결과와는 차이를 보이고 있다. 그러나 계산결과를 실험에서와 같은 방법으로 처리한 후의 결과(○)는 보다 더 실험치와 접근하고 있다. 이 때 상류영역에서의 차이는 입구속도와 두께에 대한 정확한 정보가 없어 임의로 속도를 주었기 때문이다. Fig. 3에는 Min 과 Choi[6]에 의해 계산된 본 문제에 대한 유동과 압력장을 보여준다. 적은 유량의 경우 상부정체점 위에 재순환영역이 나타나고 이는 가속하던 액막류가 관벽으로부터의 마찰에 의해 감속되면서 두꺼워지다가 역류하여 발생하는 것이다.

Fig. 4에는  $Re=16.7$ 인 경우에 여러 가지 입구온도에 대한 온도와 농도분포를 나타내었다. 입구온도가 평형에 가까우면 상류에서는 거의 흡수가 일어나지 않고 관벽으로부터 열경계층이 발달하여야 흡수가 일어날 것임을 예측할 수 있다. 입구온도가 낮아지면 비평형도에 의해 초기에 흡수가 발생하고 온도가 올라간다. 상부정체영역에서의 재순환영역은 상대적으로 낮은 농도와 높은 온도로 구별되어진다. 여기서 농도는 액막표면 근처의 매우 얇은 영역에서만 변화하는데 이는 큰 Schmidt 수로 인한 것이다. 이에 따라 이 영역을 해석하기 위해서는 충분히 많은 격자점이 배치되어야 한다. Fig. 5에는 각 경우에 대한 흡수유속과 관벽에서의 열유속을 도시하였다. 액막은 두께가 얇아지면 표면에 수직한 온도구배가 커지고 흡수율도 증가하며 두께가 두꺼워지면 그 반대의 현상이 일어난다. 상부정체점 근처에서 흡수유속은 두꺼운 액막에 의해 급격히 낮아지나 두께가 얇아짐에 따라 다시 증가한다. 흡수율이 높아지면 더 많은 열이 발생하고 온도가 올라가며 이에 따라 온도구배가 커져 흡수 또한 증가한다. 즉 이 cycle은 자기지속적 (self-sustained)이고 온도와 농도가 완전히 발달할 때 까지 계속된다. 한편 흡수유속은 초기온도가 낮으면 그 값은 크나 후류로 갈수록 점점 감소하고 초기온도가 높으면 증가한다. 또한 관벽에서의 열유속은 그 반대의 경향을 보인다. 이 현상의 이유는 Fig. 6에서 알 수 있다. 초기온도가 낮으면 상류에서 많은 흡수가 일어나서 액막의 평균온도가 증가하고 평균농도는 감소한다. 평균온도가 증가하면 관벽으로의 열유속도 커지나 액막평균온도가 다른 경우보다 상대적으로 낮으므로 열유속의 절대량은 작아서 흡수열을 모두 전달하지 못한다. 이에 따라 평균온도는 계속 증가하고 평형도가 커져 흡수가 감소하는 것이다. 입구온도가 높으면 상류쪽의 흡수량이 적어 평균온도는 냉각에 의해 계속 낮아지고 이에 따라 관벽에서의 열유속도 작아진다. 그러나 전체액막의 평균온도가 낮아지므로 비평형도가 증가하여 흡수가 증가하는 것이다. 이와 같이 흡수가 감소하는데 비해

냉각열유속은 커지고 흡수가 증가하는 경우에는 오히려 열유속이 작아짐에 따라 관의 하부로 갈수록 모든 경우의 흡수유속의 차이는 줄어들고 있는데 이로부터 다단을 지나는 경우에는 흡수유속이 어느 한 값으로 접근하게 될 것임을 예측할 수 있다. Fig. 7에는 유량변화에 따른 온도와 농도분포를 도시하였다. 상부정체점에서의 재순환영역의 유무가 분포에 큰 영향을 주고 있으며  $Re$ 가 커질수록 큰 유량과 두꺼운 액막에 의해 열경계층이 느리게 발달하고 있다. Fig. 8에는 여러 유량에 대한 흡수유속과 관벽에서의 열유속을 나타내었다. 유량이 큰 경우 두꺼운 액막에 의해 관벽으로의 열전달 성능이 좋지 않고 이에따라 평균온도의 변화폭도 작게되며 이에 따라 흡수는 후류로 갈수록 저하된다. 한편 흡수유속은 유량이 큰 경우 가장 큰데 이것은 상류에서 흡수가 발생하여도 유량이 크면 액막의 평균온도가 그리 크게 증가하지 않기 때문이다. 그러나 흡수량은 입구유량에 대한 비로 고려하는 것이 더 타당할 것이며 이는 다음의 다단해석에서 나타내었다.

Fig. 9에는 8단의 흡수관을 지나는 다단 액막흡수현상의 결과를 나타내었다. 평균농도는 가장 윗쪽의 2개단을 지난 이후에는 거의 선형적으로 감소하며 그 기울기는 유량이 적을수록 더 급하다. 또 같은 유량에 대해서는 가장 상단부의 초기온도가 낮을수록 농도가 낮으나 이는 맨 처음의 관에서 상대적으로 흡수가 많이 일어났기 때문이며 그 이후에는 기울기가 같은 값을 유지하므로 하부관에서의 흡수량은 거의 동일하다 할 수 있다. 평균온도는 하단부의 관으로 갈수록 선형적으로 감소하나 유량이 클수록 그 현상이 늦어진다. 또한 우선 특정한 한 온도로 수렴한 후 선형적으로 감소하게 됨을 알 수 있는데 그 값은 유량이 적을수록 낮고 감소의 기울기도 유량이 적을수록 더 크게 된다. 이상의 결과로부터 다단상에서의 흡수현상에 있어 관을 지남에 따라 온도 및 농도가 어떤 완전히 발달된 상태 (fully developed state)로 수렴해 가는 것을 알 수 있으며 유량이 적을수록 그 발달거리가 짧아지게 된다. 평균온도와 농도의 감소율이 유량이 적을수록 더 큰 것은 액막두께가 얇아져 냉각효율이 상대적으로 더 좋으므로 보다 흡수에 유리하기 때문이다. 평균온도와 평균농도가 선형적으로 감소하게 되면 평형도  $Eq$ 도 한 값으로 수렴하게 되며 그 값은 유량이 클수록 커진다. 이에따라 각 흡수관당 흡수하는 유량도 한 값으로 수렴한다. 이 그림에는 각 단에서의 흡수량을 첫단에서의 유량에 대한 비로 나타내었는데 유량이 적은 경우가 가장 높은 값을 나타내고 있다. 이를 종합하면 흡수기내 관군에서의 흡수액막은 각 관군의 특성, 즉 각 관열에 초기에 들어오는 유량과 관계가 있는 특정한 평형상태로 수렴해 가고, 유량이 적을수록 일찍 수렴하며 온도와 농도가 각 관을 지날 때마다 선형적으로 감소하고 평형도와 단위 관당의 흡수량이 일정해진다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

수평원관상의 액막흡수현상에 대하여 표면장력영향을 고려한 Navier-Stokes 해석으로부터 구한 유동장을 사용하여 여러 가지 유량 및 입구온도에 대한 해석을 수행하였다. 온도와 농도가 발달하기 전까지의 흡수현상은 액막두께가 얇을수록 촉진되며 흡수에 의해 온도가 올라가면 온도구배의 증가에 의해 다시 흡수가 증가하는 자기지속적인 특성을 지닌다. 한편 초기온도가 낮은 경우 상류에서의 큰 흡수로 인해 열전달이 증가하지만 평균온도도 증가하여 흡수율은 감소하고 초기온도가 높으면 흡수율은 후류로 갈수록 증가한다. 유량이 크면 두꺼운 액막에 의해 열전달능력이 저하되며 흡수도 감소한다. 다단을 통과하는 흡수액막의 온도와 농도는 상부 몇 개 단 이후부터는 선형적으로 감소하여 완전히 발달된 상태에 도달하고 이는 유량이 적을수록 빠르다. 또한 이때 평형도와 단위관당의 흡수유량이 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있고 흡수율은 유량이 적은 경우 가장 크게 된다.

#### 참고문헌

- [1] Nusselt, W., *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 60 (1916), p.541.
- [2] Grossman, G., *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26 (1983), p.357.
- [3] Choudhury, S.K. et al., *ASHRAE Trans:Research*, Vol. 99 (1993), Part 2, p.81.
- [4] Andberg, J.W. and Vliet, G.C., *Proc. ASME/JSME Joint Thermal Eng. Conf.*, Vol. 2 (1987), p.533.

- [5] 박일석, 최도형, *대한기계학회논문집(B)*, 제20권 (1996), p.670-679.
- [6] Min, J.K. and Choi, D.H., *Proc. 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf.*, (1998), p.393.
- [7] Tanaka, A. and Takaki, R, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 13 (1994), p.229.
- [8] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, (1980).
- [9] Rogers, J.T. and Goindi, S.S., *The Canadian Journal of Chem. Eng.*, Vol. 67 (1989), p.560.

Properties of LiBr-H <sub>2</sub> O solution	$C_p$	= 1520 J/kgK
	$D$	= $1.4 \times 10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s
	$Ha$	= $2.721 \times 10^6$ J/kg
	$k$	= 0.4258 W/mK
	$\mu$	= 0.006 kg/ms
Input Condition	$\rho$	= 1745 kg/m <sup>3</sup>
	$\sigma$	= 0.085 N/m
	$R$	= 9.525 mm
	$C_0$	= 0.612
	$T_0$	= 35, 40, 45, 48 °C
	$T_w$	= 30 °C
	$v_0$	= 0.223676 m/s
$\Gamma$	= 0.075-1.0 kg/ms	
$p_0$	= 1 kPa	

Table 1. Properties of LiBr-H<sub>2</sub>O solution and input conditions.

$\Gamma$ [kg/ms]	0.075	0.1	0.25	0.5	1.0
$Re$	12.5	16.7	41.7	83.8	166.7
$Fr$	26.5	19.9	7.96	3.98	1.99
$1/We$	5.1	3.8	1.5	0.76	0.38
$Pr$	21.4				
$Sc$	2456				
$Le$	0.008				
$Eq$	1 0.84 0.573 0.302				
$Ja$	0.105 0.087 0.058 0.029				

Table 2. Nondimensional numbers.

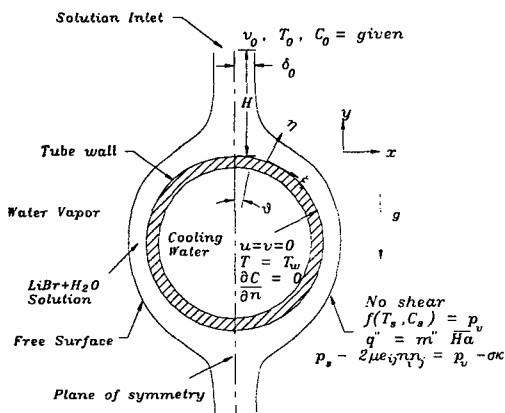


Fig. 1 Schematics of absorption film flow.

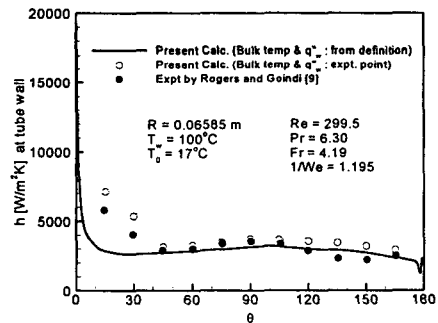


Fig. 2 Comparison of heat transfer coefficient with the experimental data.

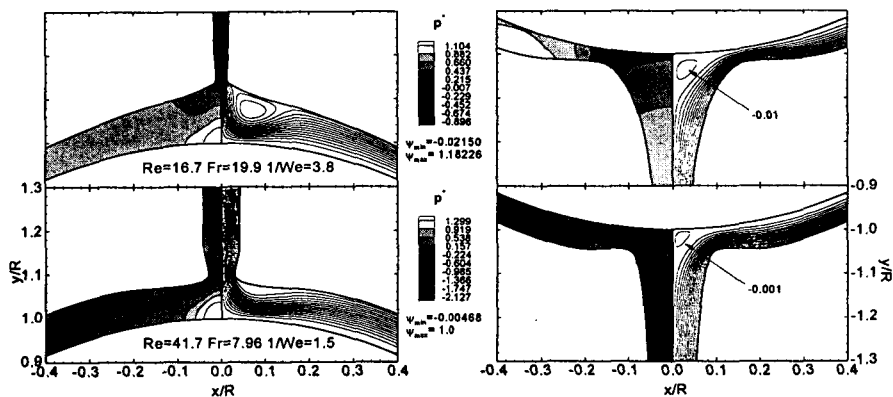


Fig. 3 Streamlines and pressure distributions.

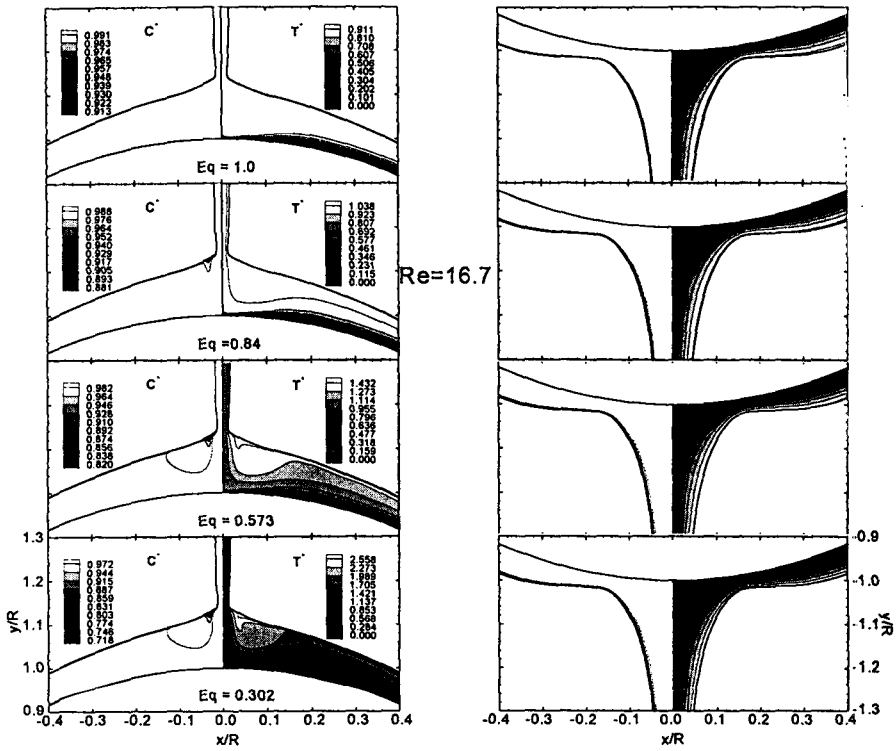


Fig. 4 Temperature and concentration for various inlet temperatures.

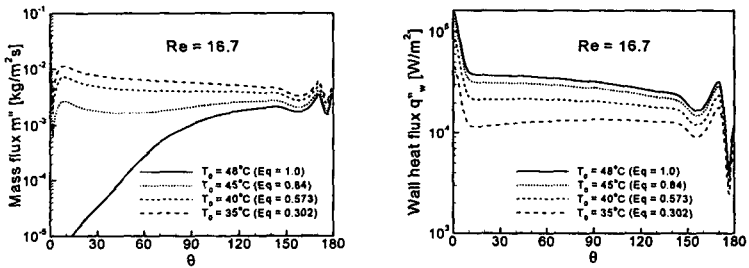


Fig. 5 Surface mass flux and wall heat flux for various inlet temperature.

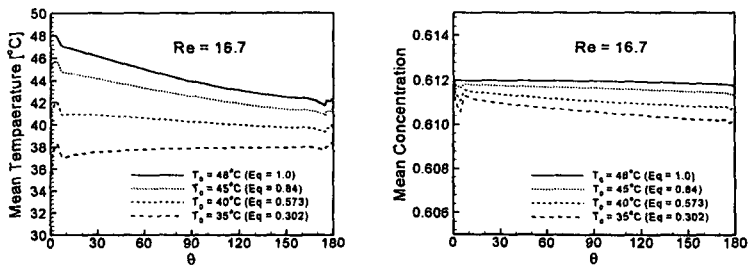


Fig. 6 Mean temperature and concentration for various inlet temperatures.

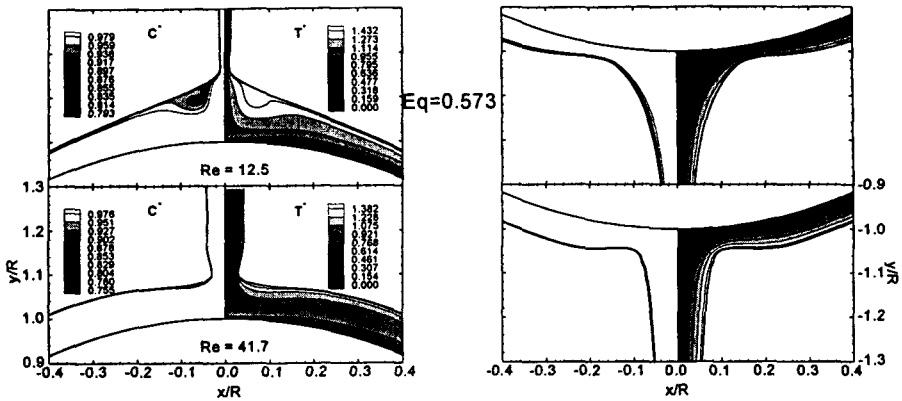


Fig. 7 Temperature and concentration for different flow rates.

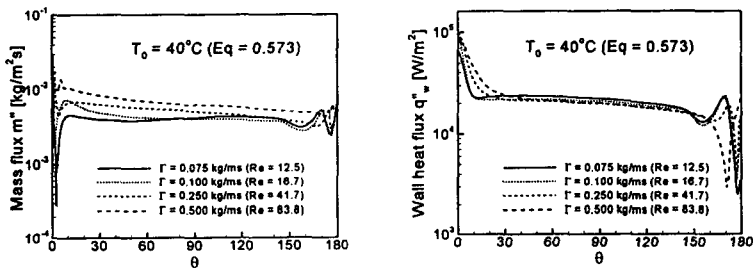


Fig. 8 Surface mass flux and wall heat flux for various flow rates.

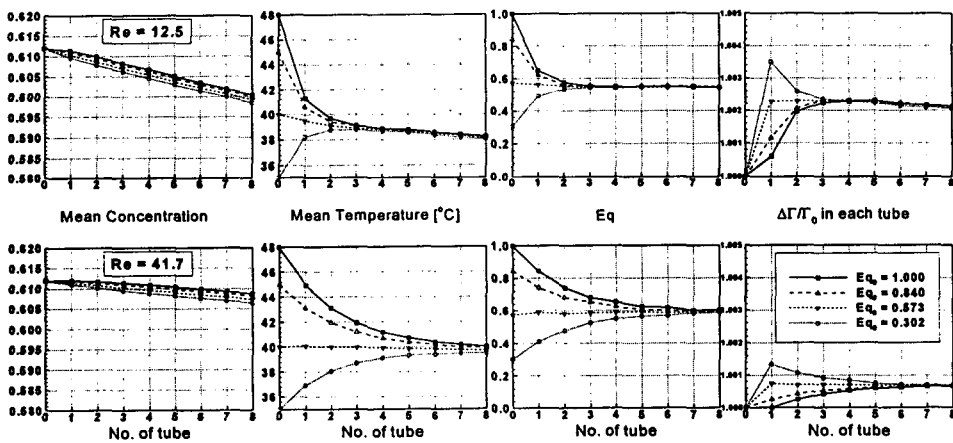


Fig. 9 Results of multi tube calculation.