

## 유동관성에 따른 Micro-Gap 판형 열교환기 내부 유동분배 수치해석

박장민\* · 윤석호\*\* · 이공훈\*\* · 송찬호\*\*\*†

\* 영남대학교 기계공학부, \*\* 한국기계연구원 열공정극한기술연구소

### Numerical Study of the Inertia Effect on Flow Distribution in Micro-gap Plate Heat Exchanger

Jang Min Park\*, Seok Ho Yoon\*\*, Kong Hoon Lee\*\* and Chan Ho Song\*\*\*†

\*School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,

\*\*Dept. of Extreme Thermal Systems, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received May 19, 2014 ; Revised August 15, 2014 ; Accepted August 25, 2014)

**Key Words:** Heat Exchanger(열교환기), Flow Distribution(유동분배), Flow Inertia(유동관성), CFD(전산유체역학)

**초록:** 본 연구에서는 micro-gap 판형 열교환기 내부의 열유동 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 특히 유량 조건에 따라 열교환기의 주 채널로부터 각 micro-gap 으로의 유동분배에 대한 유동관성의 영향에 대하여 조사하였다. 열교환기 주 채널의 유동을 레이놀즈 수 100 부터 10000 까지 변화시키며 그에 따른 각 micro-gap 으로의 유동분배와 온도분포의 불균일 정도를 평가하였다. 수치해석 결과 유동분배는 유동관성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 관성 효과를 감소시킬 수 있는 헤더 설계를 통해 유동분배 불균일 정도를 줄일 수 있었다. 또한 micro-gap 을 통과한 유체의 온도분포의 불균일 정도는 주 유량이 증가함에 따라 증가 후 감소 추세를 나타냈다.

**Abstract:** This paper presents numerical study on flow and heat transfer characteristics in micro-gap plate heat exchanger. In particular, we investigate the effect of flow inertia on the flow distribution from single main channel to multiple parallel micro-gaps. The flow regime of the main channel is varied from laminar regime (Reynolds number of 100) to turbulent regime (Reynolds number of 10000) by changing the flow rate, and non-uniformity of the flow distribution and temperature field is evaluated quantitatively based on the standard deviation. The flow distribution is found to be significantly affected by not only the header design but also the flow rate of the main channel. It is also observed that the non-uniformity of the temperature field has its maximum at the intermediate flow regime.

- 기호설명 -

$c_p$  : 열용량

$h$  : 마이크로채널 벽면 대류 열전달 계수

$k$  : 열전도도

$P$  : 평균압력

$\Delta P_l$  : 마이크로채널 입출구 압력차

$q$  : 열유량

$q_m$  : 마이크로채널 벽면의 열유량

$S$  : 평균속도, 평균압력, 평균온도

$T$  : 평균온도

$T_0$  : 입구평균온도

$T'$  : 섭동온도

$U$  : 평균속도

$U_0$  : 입구평균속도

$U_m$  : 마이크로채널 내 유동 평균속도

$u'$  : 섭동속도

$\mu$  : 점도

$\rho$  : 밀도

† Corresponding Author, sch@kimm.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

#### 1. 서론

최근 미세가공기술의 발달을 통해 높은 효율을

가진 마이크로 열유체 시스템 제작에 대한 연구가 많이 진행되어왔다.<sup>(1~9)</sup> 대표적으로 마이크로펌프, 마이크로믹서, 마이크로채널 열교환기 등을 들 수 있으며, 학문적 연구뿐 아니라 산업 각 분야에서 많은 연구 개발이 되어 왔다.

마이크로채널 열교환기는 적은 부피로도 높은 열전달 성능을 얻을 수 있어, 화학공정, 발전 플랜트, 마이크로 열유체 시스템 등에서 많은 관심을 받아왔다. 이에 따라 마이크로채널 열교환기의 열전달 성능과 압력 손실에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다.<sup>(2,3,6,7,9,10)</sup> 압력 손실의 경우, 실험 결과와 고전적인 유체역학 이론이 잘 맞는 것으로 알려져 있다.<sup>(4,6,7,9)</sup> 반면 마이크로채널 내부 열전달 현상은 최근까지도 명확하게 설명되지 못한 부분들이 남아 있다.<sup>(8)</sup> 또한 많은 기존 실험 결과들이 서로 맞지 않는 경우가 있으며, 따라서 이와 관련한 체계적인 연구의 필요성이 보고된 바 있다.<sup>(8)</sup> 이에 따라 기존 실험 결과들에 대한 분석 연구가 진행 된 바 있으며,<sup>(5)</sup> 그 결과 입구 유동 영향, 물성의 온도 의존성, 입구/출구의 유동 발달, 유동 분배 불균일 등을 엄밀히 고려할 필요가 있음이 보고된 바 있다.<sup>(5,7)</sup>

현재까지 마이크로채널 열교환기 내부 열유동에 대한 다양한 수치 해석 연구가 진행되어 왔다.<sup>(1,10~19)</sup> 마이크로채널 열교환기 수치해석 경우 적합한 경계조건과 물성치를 도입하면 고전적인 유체역학 이론 만으로도 실험결과를 근접하게 모사할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 그 중 특히 유동분배에 대한 연구가 중요하게 다루어져 왔으나, 마이크로채널 열교환기 구조의 특성 상 엄밀한 해석을 수행하기는 힘든 상황이다. 이러한 문제를 극복하기 위한 근사 해석 방법들이 제안된 바 있으나,<sup>(14,17)</sup> 이는 헤더 내 압력 분포가 균일한 것으로 가정하였다는 한계가 있다. 최근에는 직접적인 수치해석을 통해 마이크로채널 형상, 입구/출구 배치, 헤더의 형상에 따른 유동분배에 대한 연구가 다수 진행되고 있다.<sup>(3,6,10~12,16)</sup>

본 연구에서는 유동관성의 영향에 따른 micro-gap 판형 열교환기 내부 유동분배에 대한 수치해석을 수행하였다. 열교환기의 유량을 변화시키며 내부 각 micro-gap 으로의 유동분배 및 온도분포를 해석하고, 또한 헤더 형상에 따른 유동분배 및 온도분포 변화를 확인하였다.

## 2. Micro-gap 판형 열교환기

본 연구에서 고려된 micro-gap 판형 열교환기의

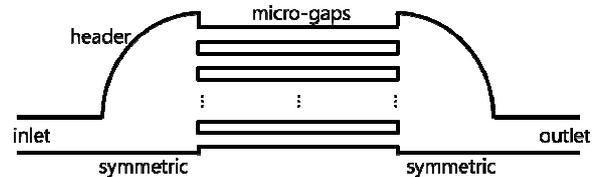


Fig. 1 Two-dimensional computational domain for a micro-gap plate heat exchanger

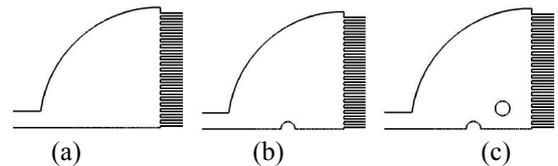


Fig. 2 Header geometries of (a) design 1 the original one, (b) design 2 having one circular element and (c) design 3 having three (due to symmetry) circular elements

단면 형상은 Fig. 1 과 같으며, 도면의 수직방향으로 균일한 형상을 가진다고 가정하여 Fig. 1 의 2 차원 공간에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 대칭 조건을 적용하여 열교환기 전체의 절반만을 계산영역으로 하였다. 이와 같은 2 차원 해석은 실제 micro-gap 판형 열교환기 및 마이크로채널 열교환기에서 형성되는 3 차원 유동을 엄밀하게 표현하지는 못하지만, 유동 관성의 영향에 대한 기본적인 유동분배 특징을 이해하기에 적절하다.

Fig. 1 에서 입구와 출구를 구성하는 주 채널(폭  $D$ )은 반 실린더형 헤더(반지름  $R$ )를 통해 20 개의 micro-gap (폭  $d=100\mu\text{m}$ , 길이  $l$ )로 연결되어 있다. 각 micro-gap 사이 간격은  $d$  이다. 수치해석에 사용된 형상 치수는  $d/D=0.09$ ,  $R/D=3.69$ ,  $l/d=200$  으로 고정하였다. 각 micro-gap 의 구분을 위해 아래쪽 micro-gap 부터  $n=1, 2, 3, \dots, 20$  으로 번호를 부여하였다.

한편 유동분배에 미치는 헤더 형상의 영향을 확인하기 위하여 세 가지 헤더 형상에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 각각 Fig. 2 에 나타나있다. 헤더 design 2 와 design 3 은 원형 요소(반지름  $r$ ,  $r/D=0.22$ )를 헤더 내부에 도입한 경우이며, 주 채널로부터 주입되는 유동의 관성을 분산시키기 위해 도입하였다. 세 가지 경우에 대해 micro-gap 유동분배와 온도분포를 비교하고자 한다.

## 3. 수치 해석

Fig. 1 의 헤더와 주 채널 내부 유동은 유량 조건에 따라 난류 유동일 수 있다. 한편 micro-gap 내부 유동은 완전 발달된 영역의 경우 층류이지만,

입구 주위에서는 헤더 내 유동의 영향을 받는다. 이와 같은 난류와 입구 영향을 고려하기 위해 본 연구에서는 난류 유동의 지배방정식을 이용하여 해석을 수행하였다. 유체는 비압축성으로 가정하였다. 정상상태 유동으로 가정하여, 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] - \nabla \cdot [\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} T) = \nabla \cdot \left[ \frac{k}{c_p} \nabla T \right] - \nabla \cdot [\rho \mathbf{u}' T'] \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 우변 마지막 항은 난류의 영향을 나타내며 주로 Boussinesq 가정을 적용한다.<sup>(20)</sup> 난류모델로 Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  모델을 이용하였다.<sup>(21)</sup>

Fig. 1 에서 총 5 개의 경계면(주 채널 입구  $\Gamma_i$ , 주 채널 출구  $\Gamma_o$ , 헤더 벽면  $\Gamma_h$ , micro-gap 벽면  $\Gamma_m$ , 대칭면  $\Gamma_s$ )에 대하여 다음과 같은 경계조건을 적용하였다.

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0, T = T_0 \quad \text{on } \Gamma_i \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = 0, \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{on } \Gamma_h \quad (5)$$

$$\mathbf{U} = 0, \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = q_m \quad \text{on } \Gamma_m \quad (6)$$

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n} = 0, \nabla S \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{on } \Gamma_s \quad (7)$$

$$P = 0 \quad \text{on } \Gamma_o \quad (8)$$

식 (4)는 입구 유동의 속도( $\mathbf{U}_0$ )와 일정한 온도( $T_0$ ), 식 (5)는 헤더 벽면에서 no-slip 과 단열, 식 (6)은 micro-gap 벽면에서 no-slip 과 일정한 열유량( $q_m$ ), 식 (7)은 대칭면에서의 대칭 조건, 식 (8)은 출구에서 압력조건을 적용한 것이다. 한편 micro scale 의 채널에서는 벽면에서의 거칠기가 채널의 폭에 비해 무시할 수 없는 크기를 가지게 되며, 이러한 이유로 표면 거칠기의 영향에 대한 중요성이 강조된 바 있다.<sup>(22,23)</sup> 이러한 표면 거칠기의 영향에 의해 마이크로채널의 유동장, 압력손실 및 열전달 특성이 영향을 받게 되므로 이러한 영향을 포함한 해석도 매우 중요한 연구 분야이지만, 본 연구에서는 no-slip 경계조건을 적용 하여 표면 거칠기의 영향을 고려하지 않는다.

주 채널의 레이놀즈수(Re)는 다음과 같이 정의할 수 있다

$$Re = \frac{\rho |\mathbf{U}_0| D}{\mu} \quad (9)$$

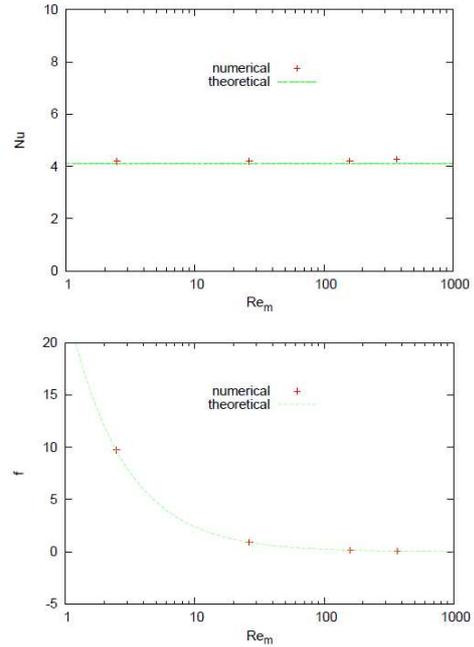


Fig. 3 Nusselt number (Nu) and friction factor ( $f$ ) of the microchannel number 1 for various Reynolds number ( $Re_m$ ) of the micro-gap flow. Theoretical Nu and  $f$  are 4.115 and  $24/Re$ , respectively (note that the length scale in Eqs. (10) and (12) is  $d$ , not the hydraulic diameter of  $2d$ )

본 연구에서 입구 유속을 변화시킴으로써 Re 를 100 부터 10000 까지 변화시켰다. 이러한 유량 조건에서 micro-gap 내부 유동의 레이놀즈수는  $10^0 \sim 10^2$  으로 유동이 완전 발달된 영역에서는 층류유동을 가지게 된다.

ANSYS Fluent 를 이용하여 위의 지배방정식과 경계조건을 해석하였다. 격자 수렴 시험을 거친 후 Fig. 1 의 계산영역을 총 398517 사각형 요소로 격자를 구성하였으며, 각 micro-gap 은 두께방향 12 요소, 길이방향 500 요소로 격자를 구성하였다. 해석 결과의 검증을 위해 micro-gap 의 층류 유동에서 열유동 특성에 대한 이론값과 비교하였다.

## 4. 수치 해석 결과

### 4.1 수치해석 검증

수치해석 결과의 유효성을 검증하기 위해 micro-gap ( $n=1$ )의 누셀수(Nu)와 마찰계수( $f$ )를 이론값과 비교하였다. Micro-gap 의 레이놀즈수( $Re_m$ ), 누셀수, 마찰계수는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$Re_m = \frac{\rho |\mathbf{U}_m| d}{\mu} \quad (10)$$

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (11)$$

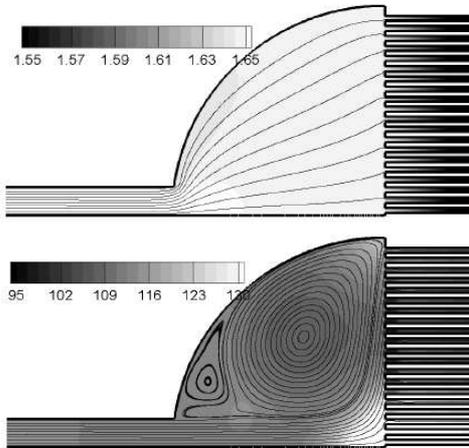


Fig. 4 Streamlines and pressure field (Pascal) in header design 1 for Re=100 (top) and Re= 5000 (bottom)

$$f = \Delta P_l \frac{d}{l} \frac{2}{\rho |U_m|^2} \quad (12)$$

헤더 design 1 에 대하여 주 채널의 Re 를 100 부터 10000 까지 변화시키는 동안 micro-gap ( $n=1$ )의  $Re_m$  은 2.5 부터 366 까지 변화하였으며, 이 때 해석 결과로부터 Nu 과  $f$  를 계산하였다. 앞에서 설명하였듯이 표면 거칠기의 영향을 고려하지 않은 해석이므로 일반적으로 알려진 완전 발달된 층류 유동의 Nu 과  $f$  의 이론값과 비교하여 수치해석의 신뢰성을 확인하고자 하였다. Fig. 3 은 수치해석 결과와 이론값을 비교한 것이다.<sup>(24)</sup> 이 때 이론값은 완전 발달된 층류 유동에 대한 값이므로, 발달 영역을 포함하고 있는 해석 결과와 약간의 차이가 있을 수 있으나, 발달 영역의 길이가 전체 길이에 비해 매우 작으므로 그 영향을 무시할 수 있다. 수치해석 결과는 이론값과 오차 2% 이내로 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

4.2 유동관성의 영향

Fig. 4 는 헤더 design 1 의 경우 두 가지 Re 에 대하여 유선과 압력분포를 보여준다. Re=100 의 경우 각 마이크로채널 입구 부위의 압력이 비교적 균일하며, 따라서 균일한 유동 분배를 가질 것이다. 반면 Re=5000 의 경우, 유동관성에 의해 중심과 외각 부위의 micro-gap 입구에 높은 압력이 형성되며 압력 분포가 불균일하다.

유동분배의 정량적 비교를 위해 각 micro-gap 유량을 평균유량으로 무차원화하여 표현하였다 ( $Q_n/Q_{mean}$ ,  $Q_n$  은 micro-gap  $n$  의 유량,  $Q_{mean}$  은 micro-gap 유량  $Q_n$  의 평균). 마찬가지로 micro-gap 출구의 온도를 무차원화하여 표현하였다 ( $T_n/T_{mean}$ ,  $T_n$  은

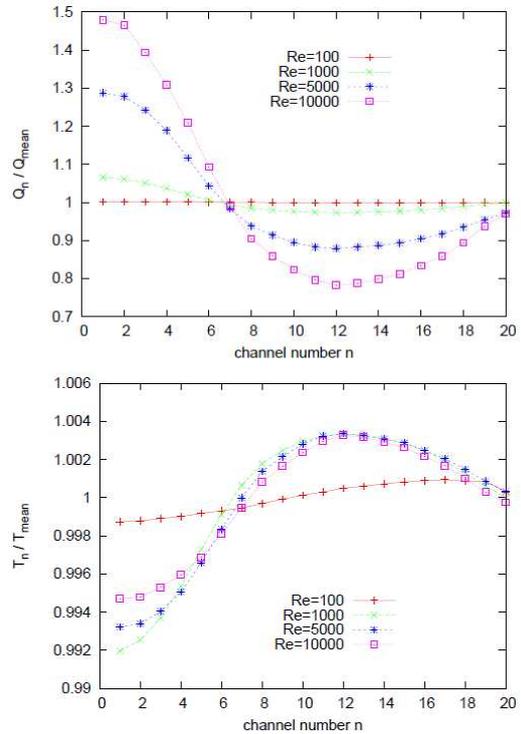


Fig. 5 Flow distribution (top) and outlet temperature distribution (bottom) of micro-gaps for header design 1

micro-gap  $n$  출구의 유량평균 온도,  $T_{mean}$  은  $T_n$  의 평균). 헤더 design 1 에 대하여 Fig. 5, 6 에 유동분배 및 온도분포 결과를 표시하였다.

Fig. 5 에 나타난 바와 같이 Re=100 일 경우 각 micro-gap 으로의 유동분배는 균일하게 나타나고, Re 를 증가함에 따라  $n=1 \sim 6$  의 micro-gap 은 유동관성에 의해 유량이 증가하게 된다. 이와 같은 현상은 Fig. 4 에서 본 바와 같이 유동 관성이 증가함에 따라 중심과 외각에 위치한 입구에 높은 압력이 형성되기 때문이다. Re=10000 의 경우 최대 유량과 최소 유량의 차이는 약 70%로 크게 나타난다.

온도분포의 경우 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 유동분배와는 다른 경향을 보인다. 이는 유량분배와 절대유량의 영향이 함께 작용하여 나타나는 현상이므로, Re 가 증가함에 따라 유량분배가 불균일해지므로 온도분포의 불균일 정도가 증가하지만, Re 를 더욱 증가하게 되면 유량이 증가하여 각 micro-gap 을 통과한 유동의 온도변화가 감소하게 되어 최종적으로 온도분포의 불균일 정도가 감소하게 된다. 본 해석 경우에는 Re=1000 부근에서 온도분포의 불균일이 가장 크게 나타난 후 이후 다시 감소하고 있다. 이와 같은 결과는 식 (6)에 나타난 바와 같이 micro-gap 의 벽면에서 일정한 열유량의

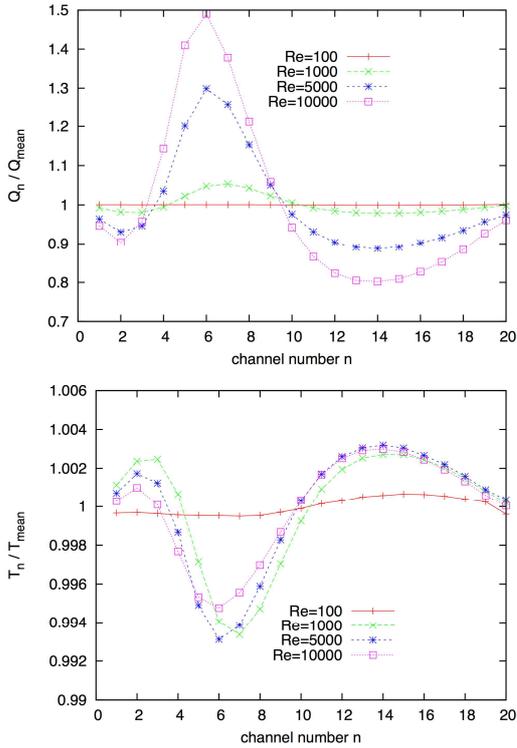


Fig. 6 Flow distribution (top) and outlet temperature distribution (bottom) of micro-gaps for header design 2

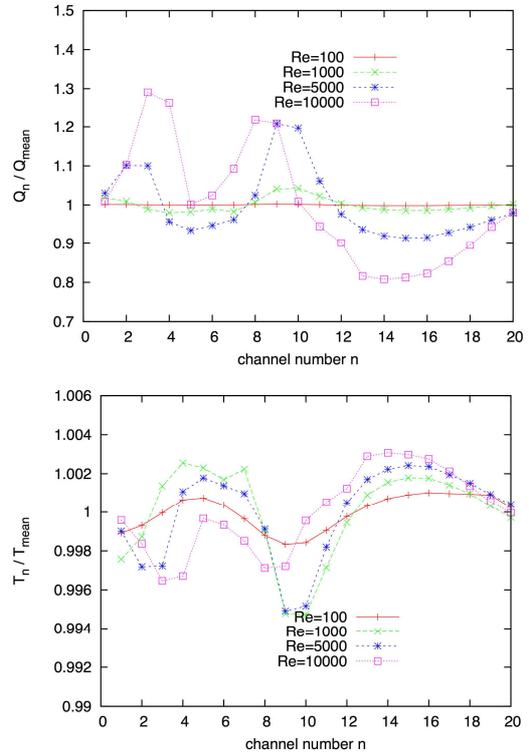


Fig. 7 Flow distribution (top) and outlet temperature distribution (bottom) of micro-gaps for header design 3

경계조건이 균일하게 적용된 경우에 대한 결과이므로, 각각의 유동분배와 온도분포의 관계는 에너지 보존에 의해 설명될 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 헤더 design 2와 3의 경우에 해당하는 유동분배 및 온도분포 해석 결과를 보여준다. Fig. 6에 나타난 design 2의 경우, 실린더를 도입함으로써 유량 집중의 위치가 변화된 것을 볼 수 있다. Fig. 7에 나타난 design 3의 경우 실린더를 추가로 도입함으로써 유량 집중이 현저하게 감소된 것을 볼 수 있다. 두 경우의 결과를 요약하면, 헤더 내부에 원형 요소를 도입함으로써 주 채널로부터의 유동 관성을 분산시킬 수 있는데, 이에 따라 유동분배 및 온도분포가 복잡해지지만, 높은 Re의 유동에 대해 불균일 정도는 효과적으로 감소하고 있음을 확인하였다. 아래에 헤더 형상에 따른 결과를 비교하여 설명하였다.

세 가지 헤더 형상에 대한 정량적 비교를 위해 유동분배 및 온도분포의 표준편차를 다음과 같이 계산하였다.

$$\sigma_Q = \sqrt{\sum_{n=1}^{20} \left( \frac{Q_n}{Q_{\text{mean}}} - 1 \right)^2} \quad (13)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{n=1}^{20} \left( \frac{T_n}{T_{\text{mean}}} - 1 \right)^2} \quad (14)$$

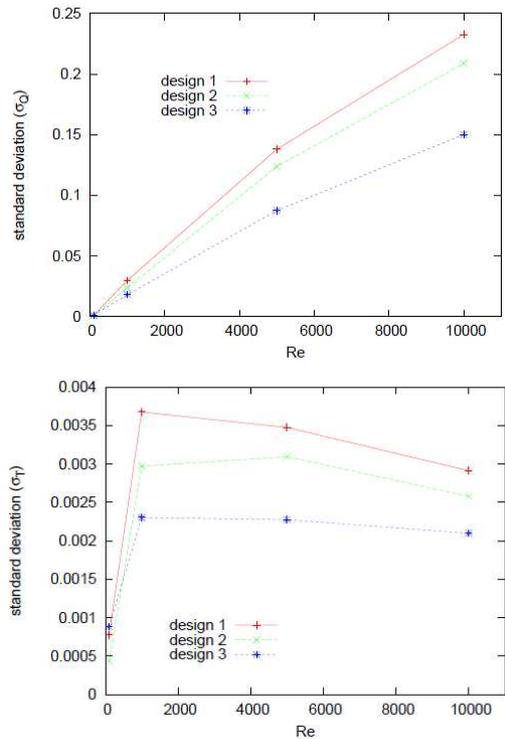


Fig. 8 Standard deviations of the normalized flow rate and the normalized temperature

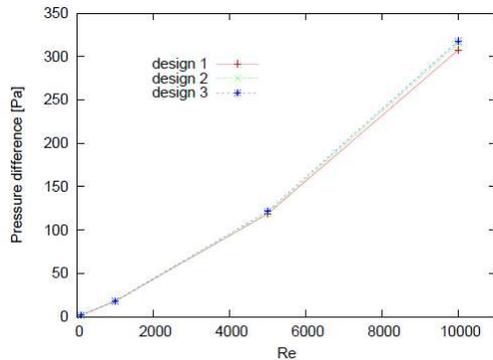


Fig. 9 Pressure loss between inlet and outlet of the heat exchanger

Fig. 7 은 Re 에 따른 표준편차 결과를 보여준다. Fig. 5 의 결과에서 확인한 바와 같이 일반적으로 Re 가 증가함에 따라  $\sigma_Q$  는 증가하고 있다. 원형 요소를 도입한 헤더 2 와 3 은  $\sigma_Q$  증가율이 감소한 것을 확인할 수 있으며 특히 헤더 3 의 경우 헤더 1 에 비해 유동분배 불균일 정도가 약 40% 감소한 것으로 나타났다. 온도분포의 경우 Re=1000 부근에서 최대  $\sigma_T$  를 보이며 이후 감소하는 추세를 보인다. 온도분포 역시 헤더 형상의 변화에 따라 불균일 정도를 감소시킬 수 있었다.

#### 4.3 압력손실

Micro-gap 열교환기에서 압력손실은 에너지소비와 연관된 중요한 요소이다. Micro-gap 입구( $\Gamma_i$ )와 출구( $\Gamma_o$ )의 압력차를 Fig. 8 에 나타내었다. 세 헤더 형상 모두 비슷한 압력손실 결과를 나타내고 있다. 그 이유는 micro-gap 관형 열교환기에서 압력손실은 대부분 micro-gap 부위에서 발생하기 때문이며, 따라서 헤더 내 원형 요소의 도입에 따른 추가적인 압력손실은 상대적으로 무시할 만 함을 나타낸다.

### 5. 결론

본 연구에서는 micro-gap 관형 열교환기 내 열유동에 관한 수치해석을 수행하였으며, 특히 Re 의 변화를 통해 유동관성에 따른 micro-gap 으로의 유동분배와 그에 따른 온도분포를 연구하였다.

주 채널의 유동이 낮은 Re 를 가지고 헤더 내부에 층류 유동이 발생할 때 각 micro-gap 으로 분배되는 유동은 균일하며, Re 를 증가함에 따라 유동관성의 영향으로 일부 micro-gap 으로 유량이 집중됨을 확인하였다.

유동분배 및 온도분포 불균일 정도를 표준편차를 통해 정량적으로 비교하였다. 일반적으로 Re

가 증가함에 따라 유동분배 불균일 정도가 증가하였으며, 온도분포의 경우 불균일 정도가 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈다. 헤더 내부에 유동관성을 분산시킬 수 있는 원형 요소를 도입함으로써 유동분배를 균일하게 할 수 있었으며, 특히 압력손실에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

본 연구에서는 micro-gap 관형 열교환기의 유동분배에 대한 기초적인 연구를 수행하였다. 해석결과 유동관성이 유동분배 및 온도분포에 큰 영향을 미치며, 따라서 열교환 성능의 최적화에 중요한 요소로 작용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 다양한 Re 에 대한 micro-gap 관형 열교환기 성능 실험에 있어서 엄밀한 결과를 얻기 위해서는 유동분배의 불균일을 최소화 할 수 있는 헤더를 도입하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

### 후기

본 연구는 한국기계연구원의 주요사업(NK182D)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

(References)

- (1) Liu, S., Zhang, Y. and Liu, P., 2007, "Heat Transfer and Pressure Drop in Fractal Microchannel Heat Sink for Cooling of Electronic Chips," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 221~227.
- (2) Lu, B., Meng, W. J. and Mei, F., 2012, "Microelectronic Chip Cooling: an Experimental Assessment of a Liquid-Passing Heat Sink, a Microchannel Heat Rejection Module, and a Microchannel-Based Recirculating-Requid Cooling System," *Microsystem Technologies*, Vol. 18, pp. 341~352.
- (3) Kim, D., Yu, C.-H., Yoon, S. H. and Choi, J. S., 2011, "Effects of Manifold Geometries on Flow Distribution to Parallel Microchannels," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 12, pp. 3069~3074.
- (4) Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E. and Yarin, L. P., 2005, "Fluid Flow in Micro-Channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1982~1998, 2005.
- (5) Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E. and Yarin, L. P., 2005, "Heat Transfer in Micro-Channels: Comparison of Experiments with Theory and Numerical Results," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 5580~5601.
- (6) Dang, T. and Teng, J.-T., 2011, "Comparisons of the Heat Transfer and Pressure Drop of the Microchannel and Minichannel Heat Exchangers," *Heat and Mass*

- Transfer*, Vol. 47, pp. 1311~1322.
- (7) Park, H. S. and Punch, J., 2008, "Friction Factor and Heat Transfer in Multiple Microchannels with Uniform Flow Distribution," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 51, pp. 4535~4543.
- (8) Morini, G. L., 2004, "Single-Phase Convection Heat Transfer in Microchannels: a Review of Experimental Results," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, pp. 631~651.
- (9) Steinke, M. E. and Kandlikar, S. G., 2010, "Single-Phase Liquid Friction Factors in Microchannels," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 45, pp. 1073~1083.
- (10) Dang, T., Teng, J.-T. and Chu, J.-C., 2010 "A Study on the Simulation and Experiment of a Microchannel Counter-Flow Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 2163~2172.
- (11) Chein, R. and Chen, J., 2009, "Numerical Study of the Inlet/Outlet Arrangement Effect on Microchannel Heat Sink Performance," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 1627~1638.
- (12) Gunnasegaran, P., Mohammed, H. A., Shuaib, N. H. and Saidur, R., 2010, "The Effect of Geometrical Parameters on Heat Transfer Characteristics of Microchannel Heat Sink with Different Shape," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1078~1086.
- (13) Liu, J.-T., Peng, X.-F. and Yan, W.-M., 2007, "Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannel Cooling Passages," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1855~1864.
- (14) Cho, E. S., Choi, J. W., Yoon, J. S. and Kim, M. S., 2010, "Modeling and Simulation on the Mass Flow Distribution in Microchannel Heat Sinks with Non-Uniform Heat Flux Conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1341~1348.
- (15) Kang, M. K., Shin, J. H., Lee, H.-H. and Chun, K., 2005, "Analysis of Laminar Convective Heat Transfer in Micro Heat Exchanger for Stacked Multi-Chip Module," *Microsystem Technologies*, Vol. 11, pp. 1176~1186.
- (16) Tonomura, O., Tanaka, S., Noda, M., Kano, M., Hasebe, S. and Hashimoto, I., 2004, "CFD-Based Optimal Design of Manifold in Plate-Fin Microdevices," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 101, pp. 397~402, 2004.
- (17) Commenge, J. M., Falk, L., Corriou, J. P. and Matlosz, M., 2002, "Optimal Design for Flow Uniformity in Microchannel Reactors," *AIChE Journal*, Vol. 48, pp. 345~358.
- (18) Guan, N., Liu, Z.-G. and Zhang, C.-W., 2012, "Numerical Investigation on Heat Transfer of Liquid Flow at Low Reynolds Number in Microcylinder-Groups," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1141~1153.
- (19) Ryu, J. H., Choi, D. H. and Kim, S. J., 2003, "Three-Dimensional Numerical Optimization of a Manifold Microchannel Heat Sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 1553~1562.
- (20) Pope, S. P., 2000, *Turbulent Flows*, Cambridge University Press.
- (21) Menter, F. R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 1596~1605.
- (22) Kandlikar, S. G., Schmitt, D., Carrano, A. L. and Taylor, J. B., 2005, "Characterization of Surface Roughness Effects on Pressure Drop in Single-Phase Flow in Minichannels," *Physics of Fluids*, Vol. 17, 100606
- (23) Webb, R. L., Eckert, E. R. G., and Goldstein, R. J., 1971, "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601-617.
- (24) Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2011, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., 7th Ed.