병렬 마이크로 채널 형상에 따른 CFD 유동해석

최용석 · 임태우[†] · 김유탉 · 김도엽
(한국해양대학교)

CFD Analysis on the Channel Shapes of Parallel Micro-Channels

Yong-Seok CHOI · Tae-Woo LIM[†] · You-Taek KIM · Do-Yeop KIM
(Korea Maritime and Ocean University)

Abstract

An numerical analysis was performed to obtain the design parameters for parallel micro-channels. The parallel micro-channels consist of 10 square channels with a hydraulic diameter of $300\mu\text{m}$ and inlet/outlet manifolds. The channel length is 5mm, 10mm and 40mm respectively. Mass flux was set between 200~600kg/m²s as inlet boundary condition and atmospheric pressure was set as outlet boundary condition. The pressure drop in channels and manifolds were estimated by using the Shah and London correlation and the flow uniformity was represented by the velocity distributions with dimensionless velocity. The results show that the flow uniformity in channels depends on shapes of manifolds, length and mass flux.

Key words : CFD, Manifold, Parallel micro channels, Pressure drop, Velocity distribution

I. 서 론

전기전자, 항공, 우주 및 에너지 활용 분야 등 각종 시스템이 발전함에 따라 부속장치에서의 발열을 효과적으로 제거하는 것이 중요한 과제로 부각되고 있다. 특히, 전기전자 분야에서는 최근 추세에 따라 소형, 경량화로 제작되는 반면에 성능은 향상되고 있으며, 이에 따라서 단위 면적당 발생하는 열은 증가하고 있어 냉각 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 마이크로 채널에서의 유동은 기존의 매크로 채널에 비해 체적당 표면적의 비가 높아 열소산 능력이 뛰어나며, 실험적인 연구를 통해 높은 열전달 계수를 가지는 것이 확인 되었다(Lee & Mudawar, 2008; Sun & Mishima, 2009; Li & Wu, 2010; Lim et al., 2011).

여러 분야에서 실제로 사용되고 있는 마이크로 채널의 형태는 다수의 채널이 병렬로 연결된 구조이다. 유동의 입·출구에 위치한 매니폴드의 형태에 따라 채널 내부 유동의 변화가 발생한다. 또한 채널간 불균일한 유동 분배는 마이크로 채널의 열·유동 특성에 많은 영향을 미치며, 결국 시스템의 성능저하로 이어진다. 따라서 매니폴드에서의 균일한 유동 분배는 마이크로 채널의 성능을 결정짓는 중요한 요소라고 할 수 있다. 하지만 마이크로 채널에 대한 연구는 주로 열전달, 압력강하에 대하여 진행되고 있으며, 유동 분배에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

Commengue 등(2002)은 Midoux 압력강하 모델을 사용하여 마이크로 채널의 기하학적 구조 및 치수가 속도분포에 미치는 영향을 분석하였으며,

[†] Corresponding author : 051-410-4256, kyunlim@kmou.ac.kr

* 본 과제(결과물)는 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과임.

Tonomura 등(2004)은 CFD를 이용한 최적형상설계 알고리즘을 통해 채널길이, 매니폴드 면적 및 형상에 따른 유동 분배에 대한 연구를 진행하였으며, Chein 등(2009)은 입·출구 매니폴드 형상에 따른 열·유동 특성을 분석하였다. 그에 따르면 불균일한 유동 분배로 인해 온도 불균형이 야기되며, U, V-Type의 수직형 매니폴드에서 상대적으로 균일한 유동 분배가 이루어지는 것으로 보고하고 있다.

현재까지의 마이크로 채널의 연구는 이론적, 실험적, 수치해석적으로 접근하고 있다. 과거에는 주로 실험적 접근방법이 사용되었으나, 실험적 접근방법은 측정기법의 한계로 인해 열·유동 특성을 결정짓는 중요한 데이터를 추출 및 시편의 제작 등 많은 어려움이 존재한다. 따라서 최근에는 수치해석적 접근방법이 도입되어 활용되고 있다.

본 연구에서는 입구 질량유속 변화와 마이크로 채널 및 매니폴드 형태에 따른 CFD 수치해석을 통해 마이크로 채널에서의 유동 특성을 분석하고, 병렬 마이크로 채널 설계에 관한 자료를 확보하고자 한다.

II. 수치해석

1. 병렬 마이크로 채널 형상

본 연구에서는 수력직경 $300\mu\text{m}$ 의 동일한 10개 정사각 채널로 구성된 병렬 마이크로 채널을 사용하였으며, 채널의 길이는 5mm, 10mm, 40mm로 설계되었다. 유체의 균일한 유동 분배를 위해 입·출구에 매니폴드를 생성시켰으며, 매니폴드는 길이별로 S-type과 I-type에 대해 각각 수직형 구조와 수평형 구조를 적용시켰다. 매니폴드 형상은 [Fig. 1]에 나타내었다. S_h -Type, I_h -Type, S_v -Type, I_v -Type은 각각 수평형 S-Type, 수평형 I-Type, 수직형 S-Type, 수직형 I-Type을 의미한다.

[Fig. 1] Geometry of Micro-Channels with Manifold

2. 해석조건

신뢰성 있는 CFD의 수치해석 해를 구하기 위해서는 우선 적절한 계산격자를 생성해야 한다. 효율적인 격자생성 및 계산을 위해서 Hexahedral 격자계로 구성하였으며, 격자 의존성 검토를 거쳐 40mm의 병렬 마이크로 채널을 기준으로 약 50만개의 격자를 생성하였다. 해석조건은 <Table 1>에 나타내었다. 본 연구에서는 질량유속, 채널길이, 매니폴드의 형상에 따른 유동 특성을 확인하는 것이 주목적이므로 채널에서의 열전달 현상은 배제하였다. 또한 연구의 결과를 추후 실험을 위한 설계자료 및 실험데이터와의 비교를 위해 활용할 수 있으므로, 실험가능한 조건과 최대한 유사하게 설정하였다. 입구조건에는 200, 400, 600kg/m²s의 질량유속(G)을 체적유량으로 환산하여 적용하였으며, 출구조건으로는 대기압조건을 부여하였다. 채널의 모든 벽면에서의 질량과 운동량 전달은 no-slip wall 조건을 적용하였으며, 채널외부는 단열처리 되었음을 가정하고 단열조건을 적용하였다. 또한 마이크로 채널에서는 속도와 점성계수에 비해 단면적이 작기 때문에 레이놀즈수는 매크로 채널에 비해 상당히 낮으며, 대부분 층류 유동장을 가진다.

<Table 1> Operating Condition

Parameter	Value
Working fluid	Water
Length of Channels	5, 10, 40 mm
Hydraulic diameter	500 μm
Inlet mass flux	200, 400, 600 $\text{kg/m}^2\text{s}$
Outlet pressure	1 atm
Turbulence	Laminar

3. 압력강하 및 속도분포 분석

마이크로 스케일에서는 펌프 동력의 한계로 인해 유체의 이송 능력이 제한되므로 마이크로 채널 내에서의 압력강하 특성을 정확히 예측하는 것은 공학적으로 매우 중요하며, 균일한 유동 분배는 장치의 성능에 직접적으로 영향을 미치는 요소로서 각 채널별 속도분포를 구하여 확인할 수 있다. 불균일한 유동 분배는 주로 채널간의 부적절한 배치 및 매니폴드의 형상에 의해 발생된다. 채널별 속도분포는 식(1), 식(2)에 의해 정의된 무차원 속도 V 를 사용하였다.

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(i) \quad \text{..... (1)}$$

$$V = \frac{v(i)}{\bar{v}} \quad \text{..... (2)}$$

N 은 총 채널수이며, v 는 속도를 나타내고, $\bar{v}$

는 전체 채널의 평균 속도를 나타낸다. 각 채널별 무차원 속도의 편차가 적으며 1에 가까운 수치를 가질 때 균일 유동이 분배되고 있다고 판단할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 압력 강하

단상유동에서의 채널내의 압력 강하는 식(3)으로 구할 수 있다. 완전발달한 층류유동에서의 포이세일리수(Poiseuille number)는 원형관에서는 상수로서 그 값은 16이며, 사각 채널에서는 Shah and London(1978)은 종횡비의 함수로서 식(4)와 같이 제안하였으며, 실험적인 연구를 통하여 단상유동에서 높은 정확성을 가지는 것이 확인되었다(Huh & Kim, 2006; Kandlikar et al., 2006; Lim et al., 2012).

$$\Delta p = \frac{2f\rho v_m^2 L}{D} \quad \text{..... (3)}$$

$$Po = fRe = 24(1 - 1.3553\alpha + 1.9467\alpha^2 - 1.7012\alpha^3 + 0.9564\alpha^4 - 0.2537\alpha^5) \quad \text{..... (4)}$$

식(3)에서 f 는 Fanning friction factor를 나타내고, v_m 은 채널에서의 유체의 평균속도, L 은 채널의 길이, D 는 원형관의 직경을 나타낸다. 식(4)에서 Po 는 Poiseuille 수를 의미하며, α 는 종횡비를 나타낸다.

(a) L=5 mm

(b) L=10 mm

(c) L=40 mm

[Fig. 2] Pressure Drop Variation with Channel Length and Mass Flux

[Fig. 2]는 각각 채널길이 5mm, 10mm, 40 mm 일 때 질량유량 변화에 따른 압력 강하를 나타내며, 타입별 수치해석 값과 Shah and London의 상관식과 비교하였다. 본 연구에서는 채널에서 뿐만 아니라 입·출구 매니폴드에서도 압력 강하가 발생하기 때문에 채널에서의 압력강하 상관식인 Shah and London의 상관식과는 다소 차이가 발생하고 있다. 압력 강하는 S_v-Type에서 가장 크게 발생하며, I_h-Type에서 가장 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, I-Type에 비해서 S-Type에서, 수평형 구조에 비해서 수직형 구조에서 많은 압력 강하가 발생하며, 이것은 곡관에서 추가적인 압력 강하가 발생하기 때문이다.

[Fig. 3]은 마이크로 채널의 종단면에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. S-Type은 I-Type에 비해 각 채널별로 고른 압력분포가 나타난다. 또한 채널길이가 길어질수록 채널에서의 압력강하가 매니폴드에서의 압력강하보다 상대적으로 커지기 때문에 각 매니폴드의 형상에 의한 영향은 줄어들며, 채널간의 압력분포 또한 균일해진다.

(a) L=5mm, S_h-Type

(b) L=5mm, I_h-Type

(c) L=5mm, S_v-Type

(d) L=5mm, I_v-Type

(e) $L=40\text{mm}$, S_h -Type

[Fig. 3] Pressure Distributions ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$)

2. 속도 분포

매니폴드 형상 및 채널 길이, 질량유속에 따른 각 채널별 속도분포는 식(2)를 사용하여 [Fig. 4]에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 4가지 매니폴드 형상에 대해서 무차원 속도의 최대치는 S_h -Type에서 가장 높게 나타나며, S_v -Type의 무차원 속도분포 경향과 거의 일치한다. 마찬가지로 I_h -Type은 I_v -Type의 속도분포 경향과 거의 일치한다. 즉, 각 채널별 속도분포 경향은 주로 매니폴드

(a) $L=5\text{mm}$, $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$

(b) $L=5\text{mm}$, $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$

(c) $L=10\text{mm}$, $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$

(d) $L=10\text{mm}$, $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$

(e) $L=40\text{mm}$, $G=200\text{kg/m}^2\text{s}$

(f) $L=40\text{mm}$, $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$

[Fig. 4] Dimensionless Velocity Variation with Channel Length and Mass Flux

드 형상에 좌우되며, 수직형, 수평형 구조에 따른 속도분포의 영향은 상대적으로 적게 나타난다. 또한 각 채널별 무차원 속도의 편차는 질량유속이 증가할수록 커지며, 채널길이가 길어질수록 감소하는 것을 알 수 있다. 속도분포는 앞서 고찰한 압력강하와 밀접한 관련이 있다. 채널길이가 길어질수록 각 채널간의 압력분포는 고르게 나타나며, 이에 따라 속도분포 또한 고르게 나타나게 된다. 또한 압력강하는 식(3)에 의하면 속도

의 제곱과 비례하기 때문에 속도의 증가량에 비해 압력강하의 증가량은 더욱 커지게 된다.

[Fig. 5]는 마이크로 채널의 종단면에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. S-Type 매니폴드의 경우 입구와 근접한 채널에서 낮은 속도를 가지며 출구측으로 갈수록 속도는 증가한다. 또한 매니폴드의 코너측에서 재순환 영역이 발생하는 것을 알 수 있으며, 재순환 영역은 입·출구 매니폴드에서 각각 다르게 나타난다. 그리고 입구 매니폴드

(a) L=5mm, S_h-Type

(b) L=5mm, I_h-Type

(c) L=5mm, S_v-Type

(d) L=5mm, I_v-Type

(e) L=40mm, S_h-Type

[Fig. 5] Velocity Distributions ($G=200\text{kg/m}^2\text{s}$)

에서 채널로 유입되는 부분에서는 부분적으로 베나 콘트랙타(vena contracta)가 형성되고 있으며, 이로 인해 속도는 순간적으로 증가하다가 다시 감소한다. 베르누이 방정식에 따르면 속도수두가 압력수두로 변환될 때 손실은 없지만 실제로는 점성소산에 의해 운동에너지가 마찰열로 변하기 때문에 속도가 감소하며 압력수두가 회복하는 과정에서 손실이 발생하게 된다.

I-Type 매니폴드의 경우 입·출구와 같은 직선유로를 형성하는 중간부분의 채널에서는 높은 속도를 가지며 양 끝으로 갈수록 속도는 감소한다. I-Type 매니폴드의 경우 S-Type에 비해 재순환 영역이 넓은 영역에 걸쳐 발생되고 있다.

수직형 매니폴드 구조에서는 채널 후단과 출구 매니폴드측에서 발생하는 후류(wake)가 수평형 구조에 비해서 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

매니폴드의 최적설계를 위해서는 반복설계를 통해 입·출구부의 재순환 영역을 배제할 수 있도록 매니폴드 형상을 설계하고, 채널로 입사하는 유동에 적절한 입사각을 형성시켜 채널로 유입되는 부분에서의 베나 콘트랙타의 형성이 최대한 억제되도록 하여야 한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 채널길이와 매니폴드의 형상 및 입구조건 변화에 따른 병렬 마이크로 채널에서의 유동 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 고려한 4가지 채널 형상에서는 질량 유속이 낮을수록, 채널길이가 길수록 압력분포와 속도분포가 고르게 나타났다. 이것은 질량유속이 높아질수록, 채널의 길이가 짧아질수록 입·출구 매니폴드의 형상이 유동 분배에 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

2. 채널별 속도 분포 경향은 주로 매니폴드 형상에 의해 결정된다. S-Type 매니폴드는 입구와 근접한 채널에서 낮은 속도를 가지며 출구측으로 갈수록 속도는 증가하며, I-Type 매니폴드는 중간부분의 채널에서 높은 속도를 가지며 양 끝으로 갈수록 속도는 감소한다.

3. 일반적인 매니폴드 형상에서는 부분적으로 재순환 영역이 발생하며 채널의 입구측에서는 베나 콘트랙타가 형성되어 속도수두의 손실이 발생한다. 매니폴드의 최적설계시 이러한 사항을 고려하여야 한다.

Reference

- Lee, Jaeseon., Mudawar, Issam(2008). Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two-phase micro-channel heat sinks - Part 1: Experimental methods and flow visualization results, International Journal of HEat and Mass Transfer 51 4315~4326.
- Sun, Licheng., Mishima, Kaichiro(2009). An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 5323~5329.
- Li, Wei., Wu, Zan(2010). A general correlation for evaporative heat tranfer in micro/mini-channels, International Journal of Heat and Mass Transfer 53 1778~1787.
- Lim, Tae-Woo., You, Sam-Sang., Choi, Hyeung-Sik., Kim, Dong-Hyuk(2011). Boiling Heat Transfer Characteristics of Deionized Water in Microchannel, Journal of the Korea Society of Marine Engineering, 35(6) 750~756.
- Commence, J. M., Falk, L. J., Corrious, P., Matlosz, M(2002). Optimal Design for Flow Uniformity in Microchannel Reactors, AIChE Journal, 48(2) 345~358.
- Tonomura, Osamu., Tanaka, Shotaro., Noda, Masaru., Kano, Manabu., Hasebe, Shinji., Hashimoto, Iori(2004). CFD-based optimal design of manifold in plate-fin microdevices, Chemical Engineering Journal, 101 379~402.
- Chen, Reiyu., Chen, Janghwa(2009). Numerical study

- of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance, International Journal of Thermal Sciences, 48 1627~1638.
- Shah, R. K., London, A. L.(1978). Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data, Supplement 1, Academic Press, New York.
- Huh, Cheol., Kim, Moo Hwan(2006). Two-phase Pressure Drop in a Horizontal Rectangular Microchannel, KSME, 30(11), 1035~1042.
- Kandlikar, S. G., Garimella, Srinivas. Li, Dongqing., Colin, Stephane., King, M. R. (2006). HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN MINICHANNELS AND MICROCHANNELS, ELSEVIER Ltd, Oxford.
- Lim, Tae-Woo., Choi, Jae-Hyuk., Kim, Jun-Hyo., Choi, Yong-suk(2012). Pressure drop due to Friction in Small Rectangular Channel, Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, 18(5) 461~467.
-
- 논문접수일 : 2013년 08월 14일
 - 심사완료일 : 1차 - 2013년 09월 05일
2차 - 2013년 09월 12일
 - 게재확정일 : 2013년 09월 19일