

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.1.001

ISSN 1226-4881

형상법칙을 이용한 트리구조의 압력강하 최적화 연구

조기현^{*,**†} · 이재달^{*} · 김무환^{*}

* 포항공과대학교 기계공학과, ** (재)포항산업과학연구원

Study on Pressure Drop Optimization in Flow Channel with Two Diameters by Using Constructal Theory

Kee-Hyeon Cho^{*,**†}, Jae-Dal Lee^{*} and Moo-Hwan Kim^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

** Energy & Resources Research Dept., Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST)

(Received July 23, 2009 ; Revised November 17, 2010 ; Accepted November 18, 2010)

Key Words : Constructal Law(형상법칙), Cooling Channel(냉각채널), Pressure Drop(압력강하), Optimization(최적화)

초록: 트리구조의 채널형태를 갖는 정방형 냉각관을 대상으로 형상법칙에 근거하여 유동저항이 최소화 된 채널구조를 해석적인 방법으로 도출하였다. 두 가지(1차, 2차 형상)의 트리구조에 대해서 유동저항최적화를 수행한 결과, 시스템 크기가 증가할수록 최소화된 무차원 유동저항은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 1차, 2차 형상모델 중 압력강하를 기준으로 성능을 판단할 경우, 시스템 크기가 18² 보다 큰 경우에는 1차 형상보다는 2차 형상이 우수한 결과를 나타내었다.

Abstract: An analytical study on the flow resistance of tree-shaped channel-flow architectures was carried out based on the principle of the constructal law; the evolutionary increase in the access to currents that flow through the channels with improvements in the flow configurations were studied in a square domain using two diameters. Two types of tree-shaped configurations were optimized. The minimized global flow resistance decreased steadily as the system size N^2 increased. From the two channel configurations, the one that resulted in better pressure drop was selected. Further, it was shown that the system performance can be enhanced by adopting the second tree-shaped configurations when the system size is greater than 18².

- 기호설명 -

A : 면적	[m ²]
C : Poiseuille 상수	[m ² s]
d : 요소길이	[m]
D : 단일 수력직경	[m]
H : 직사각형 영역 높이	[m]
L : 직사각형 영역 길이	[m]
L_i : 채널번호 i 에서의 채널길이	[m]
\dot{m} : 질량유량	[kgs ⁻¹]
N : 그리드 수	
R : 유동저항	[Pa·s/m ³]

S_v : Sveltiness number(세밀도 수)	
V : 관심대상 전체 체적	[m ³]
V_c : 유동채널 체적	[m ³]
ΔP : 압력강하	[Pa]
ϕ : 공극률	
ψ : 무차원 압력강하	
μ : 유동균일도 (최대/최소유량비)	
상첨자	
* : 최적화된 결과	
하첨자	
i : 채널번호	

† Corresponding Author, khcho@postech.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

min : 최소

opt : 최적화

1. 서론

전자통신 및 컴퓨터 등 정보통신기기의 고집적화, 초소형화 추세에 따라 열 및 물질전달을 담당하는 열교환시스템에 대한 고효율화는 가장 우선적으로 해결되어야 할 과제이다. 특히, 화석연료의 고갈 및 환경문제의 대두로 인하여 더욱 열 및 물질전달 시스템의 성능을 향상시키려는 노력이 중요한 단계에 이르렀다.

일반적으로 유동시스템은 극복되어야 하는 저항 때문에 열역학적으로는 불완전하다고 볼 수 있으며, 시스템 목적 및 복잡성에 따라 다르지만 유체, 열, 전기, 화학종 등을 이송하는 구조로 되어 있다. 이러한 시스템에 작용하는 저항은 유동시스템을 결정하는 유한한 크기 때문에 총체적이고 불가피한 문제이다.⁽¹⁾

현재까지 냉매 혹은 이송물질의 펌핑동력을 최소로 하거나 열교환시 열 저항을 최소화하기 위한 연구는 다양하게 수행되어 왔으나, 상기 두 가지 목적을 모두 만족시키는 연구는 매우 부족한 실정이다. Daniels 등⁽²⁾은 디스크 형태의 내부에 프랙탈 구조로 채널을 형상화한 후 기존의 평행채널 형태의 압력손실 보다 유리한 구조의 채널을 제시하였으며, Park 등⁽³⁾은 수치해석 방법을 사용하여 미소열교환기의 열저항을 최소화하는 핀 두께 및 채널 폭을 계산하였다. 그러나, 이러한 기존 연구들은 부분 최적화(Local optimization) 방법을 이용하므로 최적값에 한계가 있었다.

Bejan⁽⁴⁾에 의해서 주창된 형상법칙(Constructal law)은 자연계에서 어떠한 시스템이 형상변화에 대한 자유도를 갖고 있다면, 유동시스템의 유로 형태는 흐름저항이 가장 작고 유동이 가장 용이한 형태로 발전한다는 자연의 법칙을 제시한 것으로서, 특이한 점은 최적화된 유동형상은 트리구조(tree-shaped, dendritic)를 갖는다는 점이다. 트리구조는 프랙탈구조를 연구하는 Daniels 등⁽²⁾ 및 Wang 등⁽⁵⁾에 의해서도 연구된 적이 있지만, 주로 Hess and Murray 법칙⁽⁶⁾에 근거하여 기하학적 비율만 도입하고 전체 최적화(Global optimization)

ion)는 수행하지 않아서 형상법칙과는 상이한 개념을 지니며,⁽⁷⁾ 실제 채널의 성능에도 차이를 나타내고 있다. 형상법칙(Constructal law)을 이용하면 한 지점(입구 혹은 출구)과 열 및 물질전달의 대상인 3차원 공간상에서의 최상의 유동조건 확보가 가능하다. 이러한 예로서, Lee 등^(8,9)은 크랙이 발생하는 위치에 자기치유 물질을 원활히 공급하기 위한 채널형상 최적화 연구를 수행한 바 있지만, 시스템 크기가 매우 작음(최대 10×10) 경우로 한정되어 실제 응용분야에 적용하기 위해서는 추가연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고분자전해질 연료전지(PEMFC)의 냉각판(Cooling plates)과 같이 임의의 3차원 공간에 냉각수를 공급해 줄 경우, 펌핑동력을 최소로 유지함과 동시에 냉각판 분기채널의 유동균일도가 가장 우수한 채널구조를 도출하고자 하였다. 이를 위하여 질량유량 m 에 요구되는 압력강하량을 목적함수, 냉각채널이 차지하는 부피인 공극률을 구속조건으로 설정하였으며, 참고문헌^(5,6)에 도입된 동일한 개념을 확장적용함으로써, 시스템 크기(최대 24×24), 복잡성(Complexity)(1차, 2차 형상) 증가에 따른 채널 구조의 최적화를 수행하였다.

2. 단일 수력직경(D) 유로의 압력강하

2.1 채널모델

본 연구에서 제시되는 정사각형 영역의 유로 구성방법은 기존 연구문헌^(8,9)에서 제시된 방법과 동일하며, 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 채널 내부유동은 정상상태, 비압축성유동
- 충분히 발달된 단상, 층류유동
- 굽힘, 교차부에서의 손실은 무시
- 모든 채널은 수직으로 교차

형상법칙은 가장 적은 유로체적을 이용하여 가장 많은 양의 열소산 성능을 구현할 수 있는 자연계 물리적인 현상에 근거한 보편적인 법칙이므로, 다음 식 (1)과 같이 관심대상영역이 차지하는 체적 대비 유로의 체적이 차지하는 비율을 정의한다.

$$\phi = \frac{V_c}{V} = \frac{\text{total channel volume}}{\text{total volume}} \quad (1)$$

여기서, V 는 관심대상 전체 체적, V_c 는 채널 공간 체적, 그리고 ϕ 는 공극률이다.

한편, 채널유로의 무차원수인 Sv (Svelteness number, 세밀도 수)는 식 (2)와 같이 정의되며, 그 값이 10을 초과하게 되면, 관심영역내의 압력 손실은 Poiseuille 마찰손실에 의해 지배되며, 유로의 수력직경이 대략 10-100 μm 범위에 위치하게 된다. 또한, 레이놀즈 수(Reynolds No.)는 약 1의 차원을 갖는다.⁽¹⁰⁾

$$Sv = \frac{(HL)^{1/2}}{V_c^{1/3}} = \frac{\text{external length scale}}{\text{internal length scale}} \quad (2)$$

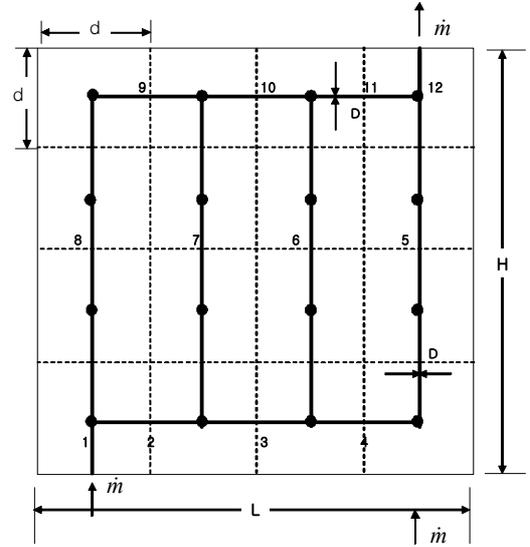
각 채널에서의 유동이 Poiseuille 법칙을 따른다고 가정하면, 길이 L_i , 수력직경 D_i , 그리고 질량유량 \dot{m}_i 에 따른 압력손실은 식 (3) 과 같다.

$$\Delta P_i = C \frac{\dot{m}_i L_i}{D_i^4} \quad (3)$$

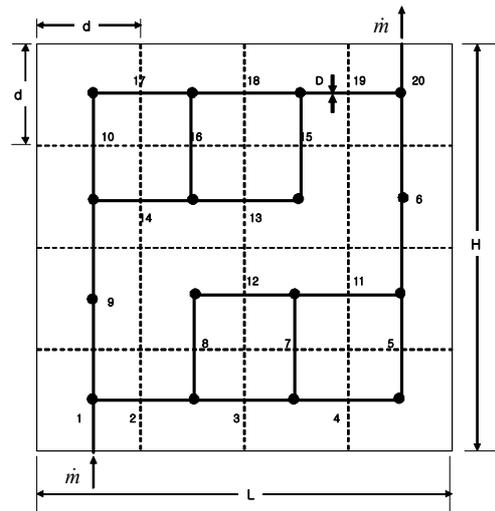
여기서, Δ 는 변화량, ν 는 동점성계수, C 는 Poiseuille 상수, D_i 는 채널번호 i 에서의 수력직경이다.

2.2 채널유동 압력손실

Fig. 1과 같이 1차 형상, 2차 형상의 채널 네트워크 구조를 도시하였다. Fig. 1(a)은 동일한 수력직경 D 를 가지면서, 높이가 H , 폭이 L 인 4×4 형태의 그리드 내부를 연결하는 채널구조를 보여주고 있으며 트리구조로 분기된 수는 1이다. 이와는 달리, Fig. 1(b)은 Fig. 1(a)의 평행채널 두 개가 조립된 형태여서 트리구조의 분기수가 총 2개 존재하는 것을 나타낸다. 자연계의 유로에서 존재하는 복잡성은 트리구조로 분기된 수로 표현이 가능하며, 인간의 폐의 경우 매우 복잡한 구조인 23개의 분기를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 문제를 단순화하고 실제 공학에 적용하기 위해 생각한 가공성 및 제작비용 등을 감안하여 2차 형상까지만을 고려하였다.



(a) 1st Construct



(b) 2nd Construct

Fig. 1 Rectangular domain with 4×4 grids and channels with one hydraulic diameter

본 연구에서 제시된 정방형으로는 4×4 그리드 구조가 가장 단순한 모델에 해당되므로 해석적인 방법을 이용하여 1차 형상모델 및 2차 형상 모델의 압력강하를 상호 비교하고자 한다.

Fig. 1(a)의 채널구조에서 유동영역 전체에 걸리는 압력강하는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

- 압력강하식

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta_{12} \\ &= \frac{Cd}{D^4} (1/2\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + 3\dot{m}_5 + 1/2\dot{m}_{12}) \end{aligned} \quad (4)$$

- 연속방정식

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_8 \\
 \dot{m}_2 &= \dot{m}_3 + \dot{m}_7 \\
 \dot{m}_3 &= \dot{m}_4 + \dot{m}_6 \\
 \dot{m}_4 &= \dot{m}_5 \\
 \dot{m}_8 &= \dot{m}_9 \\
 \dot{m}_{10} &= \dot{m}_7 + \dot{m}_9 \\
 \dot{m}_{10} + \dot{m}_6 &= \dot{m}_{11} \\
 \dot{m}_{12} &= \dot{m}_5 + \dot{m}_{11} = \dot{m}
 \end{aligned} \quad (5)$$

- 압력대칭식

$$\begin{aligned}
 \Delta P_2 + \Delta P_7 &= \Delta P_8 + \Delta P_9 \\
 \Delta P_3 + \Delta P_6 &= \Delta P_7 + \Delta P_{10} \\
 \Delta P_4 + \Delta P_5 &= \Delta P_6 + \Delta P_{11}
 \end{aligned} \quad (6)$$

- 채널 체적

$$V_c = \frac{\pi}{4} D^2 (19d) \quad (7)$$

식 (4)-(7)을 이용하여 선형연립방정식의 해를 구한 후, 관련식을 정리하면 다음과 같은 무차원 압력강하량을 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta P^*}{C d \dot{m}} \left(\frac{V_c}{d} \right)^2 = 764.7 \quad (8)$$

또한, Fig. 1(b)에 대해서도 위와 마찬가지로 방법으로 압력강하 방정식 및 연속방정식을 적용함으로써 아래와 같은 무차원 압력강하량을 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta P^*}{C d \dot{m}} \left(\frac{V_c}{d} \right)^2 = 869.6 \quad (9)$$

따라서, 위의 식 (8)과 식 (9)를 비교할 경우 1차 형상모델이 2차 형상모델의 압력강하에 비해서 약 13.7% 우수한 것으로 나타났다.

그러나, 식 (8) 및 (9)의 압력강하량은 시스템 크기 ($N \times M$)를 고려하지 않은 경우이며, 이를 고려한 무차원 압력강하식은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\psi = \frac{\Delta P}{C \dot{m}} \phi^2 d^3 \quad (10)$$

3. 다중 수력직경(D_1, D_2) 유로의 최적화

3.1 채널모델

기존 형상이론 연구들^(1,6)은 전체 유동성능 최적화는 유동구조에 자유도를 부여하는 것이라 정의했으며, 이는 채널이 만나는 부분에서의 수력직경의 비율을 최적화하는 것과 같다. 이러한 예는 생물조직의 혈관계에서 흔히 볼 수 있으며, Hess and Murray 법칙⁽⁶⁾ 및 형상법칙으로부터 유도된 트리구조에서도 쉽게 확인이 된다.

Fig. 2와 같이 시스템 크기가 10×10 그리드 구조를 갖는 정방형 트리구조에 대해서 입구, 출구 및 헤더를 포함하는 채널의 수력직경은 D_2 , 그 외의 직선 형태의 분기채널의 수력직경은 D_1 ($D_2 > D_1$)의 크기를 갖는 채널구조를 도시함으로써, 이에 대한 최적해를 계산하였다.

3.2 1차 형상의 최적화

Fig. 2(a)의 채널구조에서 유동영역 전체에 걸리는 압력강하는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

- 압력강하식

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \\
 &\quad \Delta P_7 + \Delta P_8 + \Delta P_9 + \Delta P_{10} + \Delta P_{11} + \Delta P_{30} \\
 &= C d \left(\frac{\dot{m}_1}{2D_2^4} + \frac{\dot{m}_2}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_3}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_4}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_5}{D_2^4} + \right. \\
 &\quad \left. \frac{\dot{m}_6}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_7}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_8}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_9}{D_2^4} + \frac{\dot{m}_{10}}{D_2^4} + \frac{9\dot{m}_{11}}{D_1^4} + \frac{\dot{m}_{30}}{2D_2^4} \right)
 \end{aligned} \quad (11)$$

- 연속방정식

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{20}, \quad \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{19}, \\
 \dot{m}_3 &= \dot{m}_4 + \dot{m}_{18}, \quad \dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_{17}, \\
 \dot{m}_5 &= \dot{m}_6 + \dot{m}_{16}, \quad \dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_{15}, \\
 \dot{m}_7 &= \dot{m}_8 + \dot{m}_{14}, \quad \dot{m}_8 = \dot{m}_9 + \dot{m}_{13}, \\
 \dot{m}_9 &= \dot{m}_{10} + \dot{m}_{12}, \quad \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \\
 \dot{m}_{20} &= \dot{m}_{21}, \quad \dot{m}_{21} + \dot{m}_{19} = \dot{m}_{22}, \\
 \dot{m}_{22} + \dot{m}_{18} &= \dot{m}_{23}, \quad \dot{m}_{23} + \dot{m}_{17} = \dot{m}_{24}, \\
 \dot{m}_{24} + \dot{m}_{16} &= \dot{m}_{25}, \quad \dot{m}_{25} + \dot{m}_{15} = \dot{m}_{26}, \\
 \dot{m}_{26} + \dot{m}_{14} &= \dot{m}_{27}, \quad \dot{m}_{27} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{28}, \\
 \dot{m}_{28} + \dot{m}_{12} &= \dot{m}_{29}, \quad \dot{m}_{29} + \dot{m}_{11} = \dot{m}_{30} = \dot{m}
 \end{aligned} \quad (12)$$

- 압력대칭식

$$\begin{aligned} \Delta P_{20} + \Delta P_{21} &= \Delta P_2 + \Delta P_{19} \\ \Delta P_{19} + \Delta P_{22} &= \Delta P_3 + \Delta P_{18} \\ \Delta P_{18} + \Delta P_{23} &= \Delta P_4 + \Delta P_{17} \\ \Delta P_{17} + \Delta P_{24} &= \Delta P_5 + \Delta P_{16} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{16} + \Delta P_{25} &= \Delta P_6 + \Delta P_{15} \\ \Delta P_{15} + \Delta P_{26} &= \Delta P_7 + \Delta P_{14} \\ \Delta P_{14} + \Delta P_{27} &= \Delta P_8 + \Delta P_{13} \\ \Delta P_{13} + \Delta P_{28} &= \Delta P_9 + \Delta P_{12} \\ \Delta P_{12} + \Delta P_{29} &= \Delta P_{10} + \Delta P_{11} \end{aligned}$$

- 채널 체적

$$V_c = \frac{\pi}{4}(D_2^2(19d) + D_1^2(90d)) \quad (14)$$

시스템 크기 4×4와 마찬가지로, 식 (11)~(14) 선형연립방정식의 해를 구한 후, D_1/D_2 변수에 대한 엄밀해를 정리하면 다음과 같은 수력 직경비를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{D_1^*}{D_2^*}\right) = 0.554 \quad (15)$$

또한, 식 (15)를 이용하여 최적화된 채널구조의 무차원화 압력강하량을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta P^*}{Cdm} \left(\frac{V_c}{d}\right)^2 = 21,700.0 \quad (16)$$

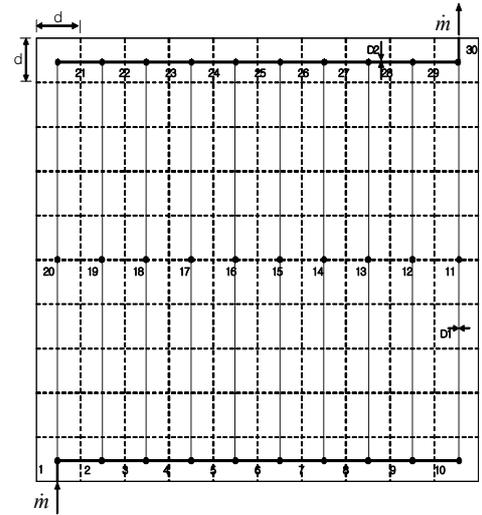
이와는 대조적으로 최적화되지 않은 경우 즉, 단일 수력직경 D 를 갖는 채널구조의 경우 최적화된 채널구조의 무차원 압력강하 기준으로 약 2.4배 증가된 약 52,860.0을 나타내었다.

또한, 시스템 크기별로 식 (15)를 만족하는 조건하에서 질량유량의 균일도를 다음과 같은 수식을 이용하여 산출하였다.

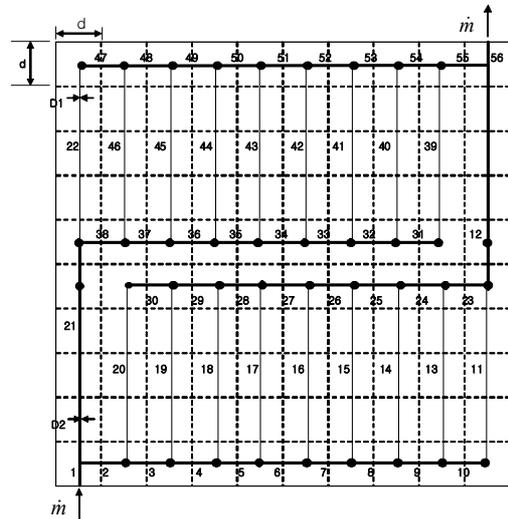
$$\mu = \frac{\dot{m}_{\max}}{\dot{m}_{\min}} \quad (17)$$

여기서, \dot{m}_{\max} 은 작은 수력직경 즉, D_1 을 통과하는 질량유량 중 최대값을 나타내며, \dot{m}_{\min} 은 최소값을 나타낸다.

마찬가지 방법으로 시스템 크기 4×4부터 24×24까지 확장하여 계산한 결과를 Table 1에 요약 정리하여 나타내었다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 시스템 크기가 증가할수록, 무차원 압력강하량 ψ 및 질량 균일도 μ 모두 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) The first construct



(b) The second construct

Fig. 2 Square flow domains with two sizes (D_1 , D_2)

3.3 2차 형상의 최적화

Fig. 2(b)에 대해서도 위와 마찬가지로, 압력강하방정식 및 연속방정식을 도입함으로써 최적화된 압력강하량 및 수력 직경비를 구할 수

Table 1 Optimized designs with the first construct channels when the channels have two diameter sizes

$N \times N$	$\left(\frac{D_1^*}{D_2^*}\right)$	(a) $\frac{\Delta P^*}{C\dot{m}} \left(\frac{V_c}{d}\right)^2$	(b) $\left[\frac{\Delta P^*}{C\dot{m}} \left(\frac{V_c}{d}\right)^2\right]_{D_1=D_2}$	$\frac{\Delta P}{C\dot{m}} \phi^2 d^3$	μ	$\frac{\Delta P_b - \Delta P_a}{\Delta P_b}$
4×4	0.739	593.4	764.7	2.318	1.199	22.4 %
6×6	0.653	3,001.5	4,914.5	2.316	1.233	38.9 %
8×8	0.595	9,199.6	18,620.4	2.246	1.221	50.6 %
10×10	0.554	21,700.0	52,860.0	2.170	1.216	58.9 %
14×14	0.496	78,215.0	258,962.3	2.036	1.202	69.8 %
18×18	0.457	202,498.7	857,768.3	1.929	1.190	76.4 %
20×20	0.442	301,440.0	1,393,280.0	1.884	1.186	78.8 %
24×24	0.416	599,851.0	3,412,448.9	1.808	1.178	82.4 %

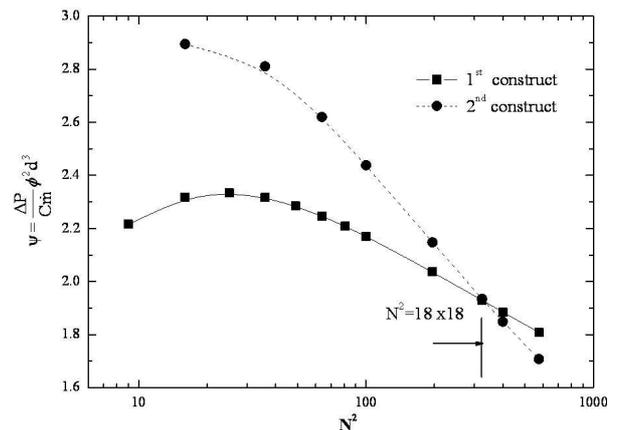
Table 2 Optimized designs with the second construct channels when the channels have two diameter sizes

$N \times N$	$\left(\frac{D_1^*}{D_2^*}\right)$	(a) $\frac{\Delta P^*}{C\dot{m}} \left(\frac{V_c}{d}\right)^2$	(b) $\left[\frac{\Delta P^*}{C\dot{m}} \left(\frac{V_c}{d}\right)^2\right]_{D_1=D_2}$	$\frac{\Delta P}{C\dot{m}} \phi^2 d^3$	μ	$\frac{\Delta P_b - \Delta P_a}{\Delta P_b}$
4×4	0.720	741.1	869.6	2.895	1.269	14.8 %
6×6	0.627	3,643.1	5,387.5	2.811	1.321	32.4 %
8×8	0.569	10,731.5	19,787.8	2.620	1.332	45.8 %
10×10	0.528	24,380.0	54,850.0	2.438	1.326	55.6 %
14×14	0.472	82,479.2	260,414.4	2.147	1.312	68.3 %
18×18	0.434	203,023.6	846,736.4	1.934	1.297	76.0 %
20×20	0.419	295,680.0	1,393,280.0	1.848	1.290	78.8 %
24×24	0.394	566,208.9	3,314,774.0	1.707	1.277	82.9 %

있으며, 시스템 크기 4×4부터 24×24까지 확장하여 계산한 결과를 Table 2에 요약 정리하였다. 1차 형상의 결과와 유사하게 시스템 크기가 증가할수록 무차원 압력강하량 ψ 및 질량 균일도 μ 모두 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 3은 Table 1-2에 근거하여 시스템 크기 N^2 이 증가함에 따른 무차원 압력강하의 변화를 나타낸 그래프로서, 1, 2차 형상 공히 시스템 크기 N^2 이 증가함에 따라서 무차원 압력강하는 지수함수적인 감소를 보이고 있으며, N 이 약 18 이후에는 2차 형상모델의 압력강하가 더 작게 역전되는 교차점이 존재하는 것이 확인되었으며, 이는 시스템 크기가 커질수록 2차 형상 채널구조가 좀 더 효율적인 모델이 될 수 있음을 나타낸다.

Fig. 4는 시스템 크기 N^2 이 증가함에 따른 1, 2차 형상채널의 최적화된 수력직경 비율의 변화를 나타낸 그래프로서, 수력직경비 D_1/D_2 는 지속적으로

**Fig. 3** The minimized global flow resistance for the channels with two sizes (D_1, D_2)

로 뚜렷한 감소경향을 나타내며, 1, 2차 형상 공히 거의 유사한 기울기를 유지하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 1, 2차 형상 채널구조의 무차원화된 압력강하량을 한 개(비최적화) 및 두 개(최적화)의

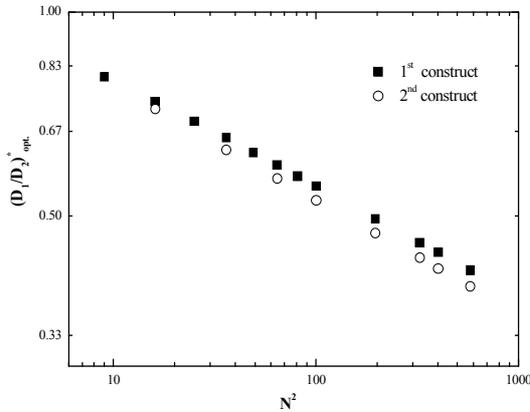


Fig. 4 The optimized ratios of channel sizes for the first construct and the second construct

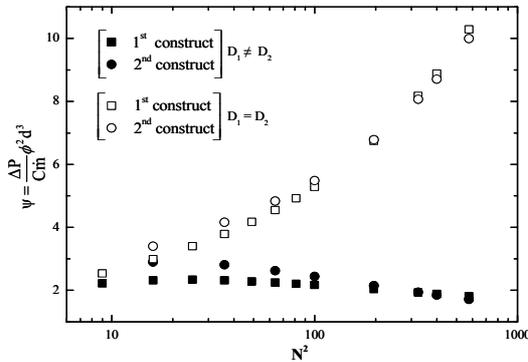


Fig. 5 Summary of the global flow resistances of all the optimized and non-optimized channels

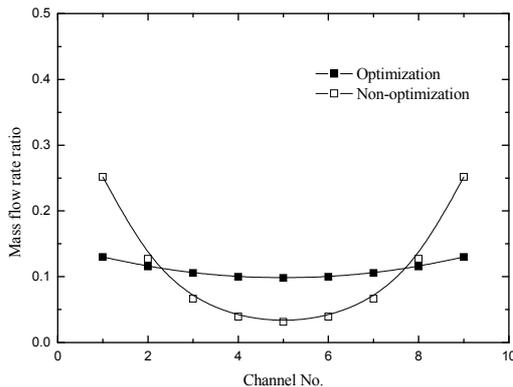


Fig. 6 Flow uniformity along the thin channels(D_1) between the optimized and non-optimized configurations for the second construct with 10×10 elements

수력직경을 갖는 구조별로 비교한 그래프이다. 비 최적화된 채널구조의 경우 무차원 압력강하량은 시스템 크기가 증가함에 따라서 기하급수적인 증가를 보이는 반면, 최적화된 채널구조의 경우에는

오히려 감소하는 현상을 나타내고 있다. 다시 말해서, 시스템 크기가 매우 큰 채널구조의 경우에는 채널구조가 반드시 최적화되어야 함을 의미하며, 이러한 개념은 마이크로채널을 설계할 경우에는 특히 고려되어야 할 사항으로 판단된다.

Fig. 6은 2차 형상(Fig. 2(b)) 구조에서 질량유량의 분포를 나타낸 그래프로써, 냉각판을 통과하는 총 질량유량 대비 얇은 수력직경(D_1)을 갖는 각 채널을 통과하는 질량유량의 비율을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이, 최적화된 경우와 최적화되지 않은 채널의 경우에 있어서 질량유량분포가 뚜렷하게 대비되는 현상을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 시스템 크기가 증가할수록 더욱 두드러지는 것으로 나타났다.

이상과 같이 요약하자면, 트리구조의 1, 2차원 형상을 압력손실을 목적함수로 최적화할 경우 유동저항이 최대 82.9%까지 감소함은 물론, 유동균일도 역시 동시에 개선되는 것으로 파악되었다. 따라서, 형상법칙을 이용하여 채널구조를 최적화할 경우 기존연구에서 한계로 인식되었던 압력손실을 저감시키면서도 열저항도 동시에 저감시킬 수 있는 채널설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 정방형 체적에 내재 가능한 트리구조에 대해서, 형상법칙을 이용하여 냉각판 시스템 크기, 형상 복잡성 증가에 따른 유동채널의 압력강하를 최적화하였으며, 그 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 시스템 크기 N^2 이 증가할수록 최적화된 무차원 압력강하량은 감소하였으며, 이에 따른 유동성능은 증가하는 것으로 확인되었다. 또한, 시스템 크기 $N=18$ 이후부터는 2차 형상모델이 좀 더 효율적인 채널구조로 나타났다.

(2) 1, 2차 형상모델 공히 시스템 크기 N^2 이 증가할수록 최적화된 수력 직경비는 지속적인 감소경향을 나타내며, 2차 형상모델의 수력직경비가 1차 형상모델의 값보다 작게 나타났다.

(3) 시스템 크기 N^2 이 증가할수록 분기관에 분배되는 질량유량의 균일도는 증가하는 것으로

나타났으며, 2차 형상모델 보다는 1차 형상모델이 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 열저항을 고려시 1차 형상모델이 더 유리할 수 있다고 판단된다.

(4) 압력손실만을 최소화시키는 구조로 형상을 최적화하더라도 질량분배 특성 또한 동시에 향상되는 효과를 나타내어 열전달 성능 역시 우수할 것으로 기대된다.

본 연구결과는 형상변화에 대한 자유도를 두 개의 수력직경으로 한정하였으나, 3개 이상의 수력직경 채널구조를 도입함으로써 압력강하에 있어서 좀 더 최적화된 채널설계가 가능할 것으로 판단되며, 연료전지 및 각종 소형 열교환기 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Bejan, A. and Lorente, S., 2004, "The Constructal Law and the Thermodynamics of Flow Systems With Configuration," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 203~214.
- (2) Daniels, B., Liburdy, J.A. and Pence, D.V., 2007, "Adiabatic Flow Boiling in Fractal-Like Microchannels," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 28, pp. 817~825.
- (3) Park, H., Jo, J., Chang, J. and Kim, S., 2006, "Methodology of Optimization for Microchannel Heat Exchanger," *IEEE Semi Therm Symposium*, pp. 65~68.
- (4) Bejan, A., 2000, *Shape and Structure: from Engineering to Nature*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (5) Wang, X., Mujumdar, A.S. and Yap, C., 2007, "Effect of Bifurcation Angle in Tree-Shaped Microchannel Networks," *J. Appl. Phys.*, Vol. 102, pp. 073530-1-073530-8.
- (6) Murray, C.D., 1926, "The Physiological Principle of Minimal Work in the Vascular System, and the Cost of Blood-Volume," *Proc. Acad. Natl. Sci.*, Vol. 12, pp. 207~214.
- (7) Gosselin, L. and Bejan, A., 2004, "Constructal Heat Tresss at Micro and Nanoscales," *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, pp. 5852~5859.
- (8) Lee, J., Kim, S., Lorente, S. and Bejan, A., 2008, "Vascularization with Trees Matched Canopy to Canopy: Diagonal Channels with Multiple Sizes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2029~2040.
- (9) Kim, S., Lorente, S. and Bejan, A., 2006, "Vascularized Materials: Tree-Shaped Flow Architectures Matched Canopy to Canopy," *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, pp. 063525-1-063525-8.
- (10) Lorente, S. and Bejan, A., 2005, "Svelteness, Freedom to Morph, and Constructal Multiscale Flow Structures," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 44, pp. 1123~1130.