Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 4 pp. 639-647, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.4.639
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

블록 크기 및 난류발생기 배치에 따른 수평채널내의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구

서규원[1], 임종한[2], 윤준규[2*]
[1]가천대학교 대학원 기계공학과, [2]가천대학교 기계공학과

A Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics according to Block Size and Turbulence Generator's Placement in a Horizontal Channel

Kyu-Won Seo[1], Jong-Han Lim[2], Jun-Kyu Yoon[2*]
[1]Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon Univ.
[2]Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

요 약 최근 전자장비의 소형화 및, 고밀도화가 되는 반도체 집적기술의 발달로 인해 칩과 모듈에서 발생되는 내부발열량을 외부로 적절히 방출시키기 위해서 열 제어시스템 적용에 대한 연구의 중요성을 인식하고 있다. 본 연구는 SST k-ω 난류모델을 적용하여 4개의 블록이 부착한 수평채널내에서 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하였다. CFD 해석시 적용한 매개변수는 블록 폭, 블록 높이, 열원 및 난류발생기 배치이고, 해석시 기본 경계조건은 채널 입구의 온도 및 유속은 300 K, 3.84 m/s, 열유속은 358 W/㎡으로 하였다. 그 결과로 블록 폭비율(w/h)이 증가할수록 열전달성능이 감소하는 반면에 블록 높이비(h/w)이 증가할수록 열전달특성은 증가하는 경향을 나타내었으며, 열원의 크기배열은 낮은 열유속에서 높은 열유속으로 증가시킬수록 열원의 영향을 받아 열전달계수는 증가하는 경향을 나타냈고, 난류발생기는 채널 입구에 가까운 블록 1번 위치의 상단에 설치했을 경우가 4개의 가열블록 전체에 가장 영향을 크게 미치게 되고, 압력강하특성을 고려할 때 가장 적절한 위치로 선정할 수 있었다.

Abstract Recently, as the semiconductor integration technology due to miniaturization and high density of electronic equipment have developed, it is importantly recognized the application of thermal control system in order to release inner heat generated from chips, modules, In this study, we considered the heat transfer and pressure drop characteristics in a horizontal channel with four blocks using k-ω SST turbulence model During CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis, the parameters applied block width, block height, heat source and turbulence generator placement etc. As the boundary conditions of analysis, the channel inlet temperature and flow velocity were respectively 300 K and 3.84 m/s, the heat flux was 358 W/㎡. As a result, the heat transfer performance was decreased as the block width ratio (w/h) was increased, while it was increased as the block height ratio (h/w) was increased. In addition, as the arrangement of heat source size was increased to high heat flux from low heat flux, it was influenced by heat source size and the heat transfer coefficient showed a tendency to increase, When the turbulence generator was installed in the upper part of block No. 1 position the closely to the channel entrance, the heat transfer characteristics was greatly influenced on the whole of four heating blocks. and in oder to consider the pressure drop characteristics, we are able to select the most appropriate turbulence generator's position.

Keywords : Horizontal Channel, Block Size, Turbulence Generator, Heat Transfer, Pressure Drop, SST k-ω Model

*Corresponding Author : Jun-Kyu Yoon(Gachon Univ.)
Tel: +82-31-750-5651 email: jkyoon@gachon.ac.kr
Received January 23, 2019 Revised February 19, 2019
Accepted April 5, 2019 Published April 30, 2019

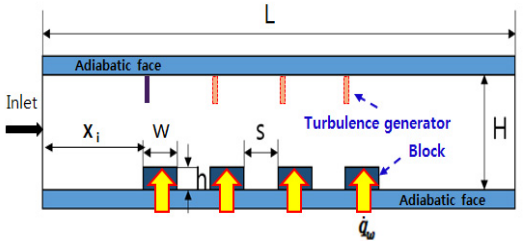
1. 서론

최근에 이르러 반도체산업의 집적기술 발달로 전자장비의 소형화, 고밀도화 및 고성능화 등이 진전됨으로써 전자장비의 칩과 모듈, 발열체, 유동방해부품 등이 다양하게 부착되어 냉각성능이 떨어져 전자부품 내에서 발생되는 과열로 인한 빈번한 고장을 초래하여 제품의 신뢰도가 저하되고 있어 장비내부의 열을 외부로 적절히 방출시키기 위한 열 제어시스템 적용에 대한 연구의 중요성이 강조되고 있다[1]. 보통 컴퓨터에 관련된 장비의 내부에는 여러 종류의 발열체 및 유동방해부품들이 PCB(Printed Circuit Board) 채널 내에 부착되어 있으며, 여러 개의 PCB들은 수직 또는 수평 채널의 형태로 설계되어 있다. 이들의 채널형태는 사용목적에 따라 블록의 설치공간, 전열면적, 열전달량 등의 구속조건을 고려하여 열전달성능을 향상시키기 위하여 냉각유체의 입구속도 증가, 열원사이의 간격 증대, 히트싱크의 형상, 난류발생기의 설치 등의 시스템을 이용한 다양한 설계기술이 적용되는 여러 연구가 활발히 진행되고 있다[2]-[5]. 이와 관련된 연구로 Sparrow et. al.[6]은 전자장비 내의 일련된 직사각형 블록 상에서 중간에 모듈이 없는 경우와 모듈 앞에 장벽이 있는 경우에 대하여 열전달 및 압력강하에 대한 특성을 비교하여 열전달 향상방안을 제시하였고, Maughan and Incropera[7]은 축방향으로 블록이 부착된 수평채널에 대하여 열적 및 동적으로 완전 발달된 유동에 대하여 블록의 기하학적 형상, 동일한 온도 및 열유속의 경계조건 등으로 변화시켜 혼합대류의 열전달 특성을 고찰하였고, Jeong[8]은 일정한 간격을 가진 수직채널내에서 수개의 일정한 온도를 갖는 발열체인 블록을 부착했을 때 대류열전달 및 유동특성을 고찰한 결과로서 레이놀즈수가 작을수록 블록의 간격이 열전달특성에 크게 영향을 미침을 보였으며, Mahaney et. al.[9]은 벽면에 블록이 존재하는 수평 사각 덕트 내에서의 부력의 효과가 층류유동 및 열전달에 미치는 영향을 연구한 결과로 레이놀즈수가 감소할 때 가열블록에서 평균열전달계수는 부력의 영향으로 감소하다가 최소값이 된 이후 다시 후 점차적으로 증가한다고 제시하였으며, Asako and Faghri[10]는 수평채널의 아래쪽 벽면에 발열체가 규칙적으로 배열되고 채널내에서 주기적으로 완전 발달된 유동으로 가정하여 3차원 층류강제대류 열전달특성을 고찰한 결과로 열유속이 발열체의 블록 윗면이 앞면보다 크고, 최대의 열유속은 블록 윗면의 모서리 부근에서 발생된다고 보고하였다. 본 연구에서는 선행연구인 Hung and Lin[11]이 수행한 수평채널내의 동일한 블록크기와 열원에서 얻어진 열전달 실험결과와 비교하기 위해 다양한 난류모델을 적용하여 수치해석의 타당성을 검증하였으며, 블록 크기(블록의 폭비율과 높이비), 열유속 크기 및 난류발생기 배치 등을 변화시켜 수평채널내의 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하였다.

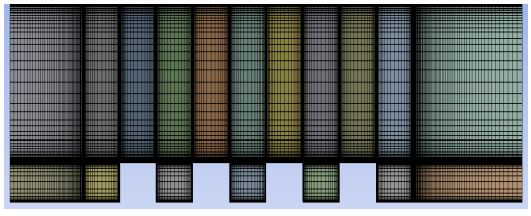
2. 이론해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 선행연구[11]에서 얻어진 실험결과와 동일한 수평채널내의 블록구조(전체길이 L=280 mm, 입구길이 x_i =60 mm, 블록 폭 w=10 mm, 블록 높이 h=10 mm, 블록 간격 s=20 mm, 채널 높이 H=50 mm)와 외부조건(공기온도 300K, 입구속도 3.84 m/s 열유속 358 W/m^2)에서 얻어진 해석결과를 비교하기 위해 동일하게 모델링하였다. Fig. 1은 해석모델의 개략도와 격자계 구성을 나타내었고, Table 1은 수평채널내에 적용하는 변수로 블록 크기(블록의 폭비율과 높이비), 열유속 크기 및 난류발생기 배치에 대한 제원을 나타내었다.



(a) Schematic of the calculating domain



(b) mesh system

Fig. 1. Schematic and mesh system of horizontal channel

Table 1. Applied specifications of horizontal channel

Parts item	Specification			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Block width, w (mm)	10, 15, 20, 25	10	10	10
Block height, h (mm)	10	5, 10, 15, 20	10	10
Block spacing, s (mm)	20	20	20	20
Channel height, H (mm)	50	50	50	50
block width ratio, w/h	1.0, 1.5, 2.0, 2.5	-	-	
block height ratio, h/w	-	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	-	
Heat flux (W/m^2)	358	358	200~250	358
Installed position of T/generator	-	-		No..1, 2, 3, 4

2. 지배방정식

본 연구에서 수평채널내의 내부유동은 2차원 정상상태, 비압축성 난류유동으로 가정하고, 유동의 박리, 재순환유동 등의 난류류경계층 해석에 우수한 성능을 보이는 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 난류모델을 적용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다[12].

- 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \quad (1)$$

- 운동량방정식

$$\frac{\partial u_i \rho u_j}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\mu\frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \quad (2)$$

- 에너지방정식

$$\rho c_p u_j\frac{\partial T}{\partial x_i}=\kappa\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (3)$$

- 난류운동 에너지방정식

$$\frac{\partial u_i \rho\kappa}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\frac{\partial\kappa}{\partial x_i})+G_s+G_t-\rho\epsilon \quad (4)$$

- 에너지 소산율방정식

$$\frac{\partial u_j \rho\omega}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega})\frac{\partial\omega}{\partial x_j}]+\frac{\gamma\rho}{\mu_t}G_s-\beta\rho\omega^2 \quad (5)$$

여기서 k는 난류운동에너지, ω는 난류운동에너지의 소산율이며, G_s는 평균속도구배에 의한 난류운동에너지의 생성항, G_t는 부력에 의한 난류운동에너지의 생성항이고, σ_κ와 σ_ω은 k와 ω에 대한 난류프란틀수를 나타난다.

2.3 수치해석

본 연구는 수평채널내에 부착된 4개의 블록표면에 가열되는 열원을 적용하여 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하기 위해서 해석 Solver는 FLUENT v.16.1를 사용하였으며, 상용프로그램인 ANSYS Workbench의 Geometry 및 Mesh를 사용하여 모델링하였다. 격자계의 구성시 벽근처에 대해서는 점성효과를 고려하기 위해 무차원거리 y+<30가 되는 점성저층 및 버퍼층 영역에 대해 충분한 격자를 주어 수치해석의 정확도를 높이도록 배려하였으며, 이러한 영역에 저레이놀즈 효과가 고려될 수 있는 모델링방법 중 Blending function을 사용하는 SST k-ω이 적용되었다. 따라서 본 해석모델의 격자계는 Fig. 1(b)에서 나타난 바와 같이 수치해석의 신뢰도를 높이기 위하여 사각형(Quadrilateral) 격자 위주로 사용하여 격자수를 2만 5천개로 구성하였다.

Table 2는 본 연구의 수치해석을 위한 격자의 품질을 적용한 상세 설정조건을 나타낸 것이다. 여기서 계산의 수렴조건은 해석의 정확성을 기하기 위해 모든 변수(온도, 유속, 압력 등)에 대해 10^{-4}까지 수렴하도록 하였다. Table 3에는 본 연구의 해석을 위한 공기 및 채널 단열벽의 물리적 성질을 나타내었다.

Table 2. Quality of mesh

Type	Quad only
Initial cells	25,000
Orthogonal Quality	1 (min)
Skewness	0 (Max.)
Aspect Ratio	1 (Max.)

Table 3. Physical properties of air and wall

Properties	Item	Value
Air (at 300K)	Density, ρ (kg/m^3)	1.225
	Specific heat, C_p (J/kg·K)	1.006
	Viscosity, μ (kg/m·s)	1.789×10^{-5}
	Thermal conductivity, k (W/m·K)	0.024
Wall (Stainless)	Density, ρ (kg/m^3)	7817
	Specific heat, C_p (J/kg·K)	5555.6
	Thermal conductivity, k (W/m·K)	16.3

3. 결과 및 고찰

3.1 난류모델의 타당성 검증

본 연구는 선행연구[13]의 실험결과와 비교를 하기 위해 채널내의 동일한 블록 크기(w/h=1.0) 및 경계조건(공기온도 300K, 입구속도 3.84 m/s, 열유속 358 W/㎡)을 적용하여 난류모델의 타당성을 검증하기 위하여 현재 CFD해석에 널리 이용되고 있는 Standard $k-\epsilon$모델, BSL(Baseline) $k-\omega$모델 및 SST(Shear Stress Transport) $k-w$모델을 적용하였다. 그 해석결과를 Fig. 2에 각 블록상면의 열전달특성을 나타내었다.

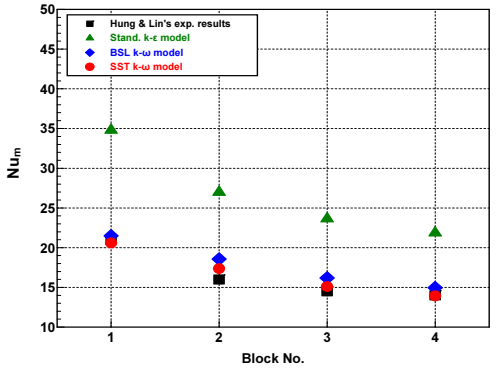


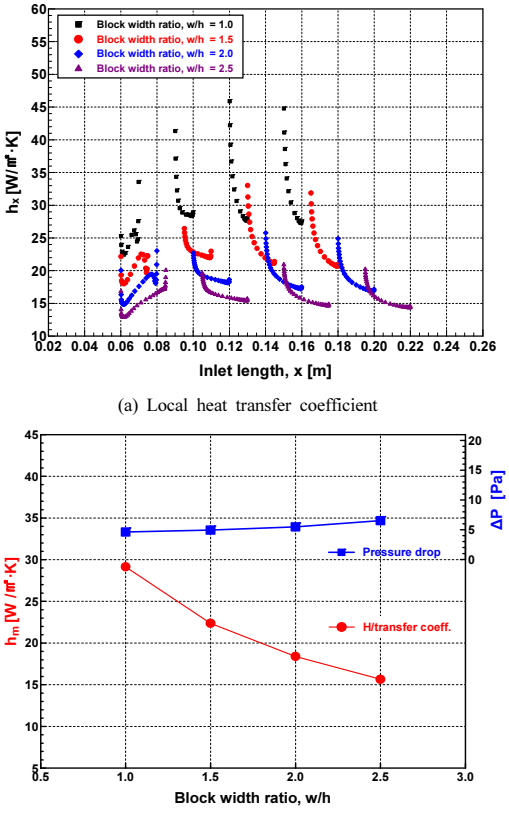
Fig. 2. Heat transfer characteristics according to block position in horizontal channel

그 결과로 이들 3가지 난류모델 중에서 박리유동 및, 재순환유동 등의 난류경계층 해석에 적합하다고 알려진 SST $k-w$ 난류모델이 실험값과 비교했을 때 평균오차 3.0% 이내외로 근사치를 보여 수치해석의 타당성을 검증할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 가장 해석에 근사한 결과를 나타난 SST $k-w$ 난류모델을 적용하였다.

3.2 블록 크기에 따른 열전달 및 압력강하

3.2.1 블록 폭비율의 영향

Fig. 3과 Fig. 4는 Table 1의 수평채널내의 적용변수인 Case 1번 조건에서 블록 폭비율 w/h=1.0, 1.5, 2.0, 2.5의 변화에 따른 각 블록 상면의 열전달특성, 압력강하 및 채널내의 유동장 특성을 나타낸 것이다.



(a) Local heat transfer coefficient

(b) Mean heat transfer coefficient & pressure drop

Fig. 3. Effects of block width ratio

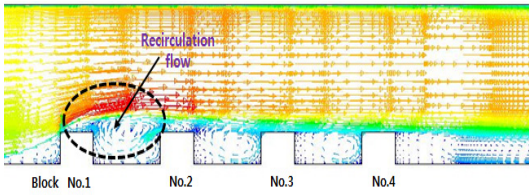
본 연구에서 해석시 산출되는 국소열전달계수 h_x, 평균열전달계수 h_m 및 평균Nusselt수 Nu_m에 관련된 식은 다음과 같다.

$$h_x = \frac{\dot{q}_w}{(T_w - T_0)} \tag{6}$$

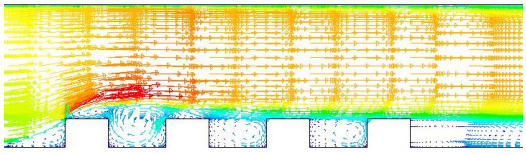
$$h_m = \frac{1}{W}\int_x^{x+W} h_x\, dx \tag{7}$$

$$Nu_m = \frac{1}{W}\int_x^{x+W} Nu_x\, dx \tag{8}$$

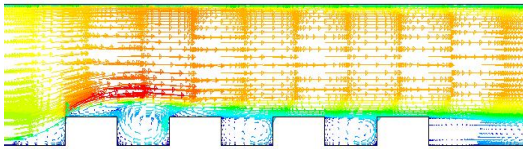
여기서 $\dot{q}_w$는 블록 가열부의 열유속, T_w는 각 블록표면의 온도, T_0는 유체온도, W는 블록 폭이다. 그 결과로 Fig. 3의 열전달 및 압력강하 특성을 Fig. 4에 나타난 속도벡터특성을 고려해볼 때, 1번 블록 전단에서 유속이 상승함으로써 유동박리가 일어나 열전달계수가 증가하다가 그 이후 감소하는 형태를 나타나면서 일정한 지점에서 오히려 역 열전달현상[13]이 나타나는데, 이는 1번 블록 후단에서 1번 블록과 2번 블록 사이에서 발생하는 재순환유동이 1번 블록 뒤쪽 상부까지 침투하게 되기 때문에 그 유동의 영향으로 열전달특성이 크게 달라짐을 알 수 있다.



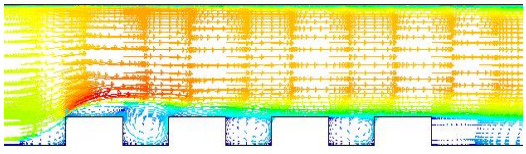
(a) Block width ratio, w/h =1.0



(b) Block width ratio, w/h =1.5



(c) Block width ratio, w/h =2.0



(d) Block width ratio, w/h=2.5

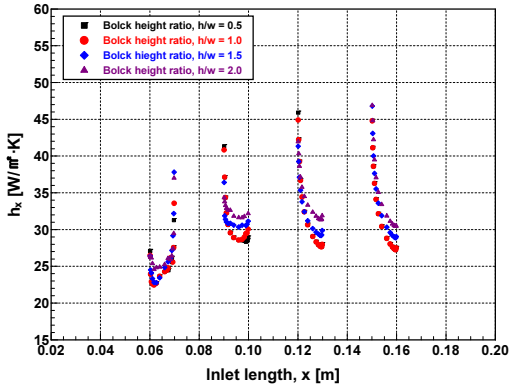
Fig. 4. Flow field characteristics according to block width ratio

또한 2번, 3번, 4번 블록의 경우에는 각각 블록 후단에서 재순환영역이 나타나기는 하나 그 블록상면에서 그 와류의 세기가 크게 영향을 미치지 않기 때문에 역 열전달현상은 발생하지 않았음을 알 수 있었다. 특히 3번 및 4번 블록의 경우에 블록 전단에서 가장 높은 국소열전달계수 값을 보여주며, 이후 블록 후단으로 갈수록 급격하게 열전달계수 값이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 블록 전단의 상부 모서리부근에서 유동의 박리가 발생하게 되어 큰 압력강하가 발생하면서 상대적으로 큰 유속으로 인해 높은 열전달특성을 보이다가 그 이후 블록 상부면을 지나면서 경계층이 발달되면서 열전달특성은 낮아지기 때문이라 사료된다. 결과적으로 블록 폭비율(w/h)이 증가할수록 열전달성능이 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 각 블록 상부표면을 통한 전체 열량은 증가하게 되어 동일한 열유속조건에서는 오히려 열전달성능이 떨어지는 현상으로 기인된다. 따라서 w/h가 증가할수록 유체와 접하는 면이 증가하게 되어 약간의 압력손실이 증가함으로써 열전달성능에는 큰 기여를 하지 못함을 알 수 있었다.

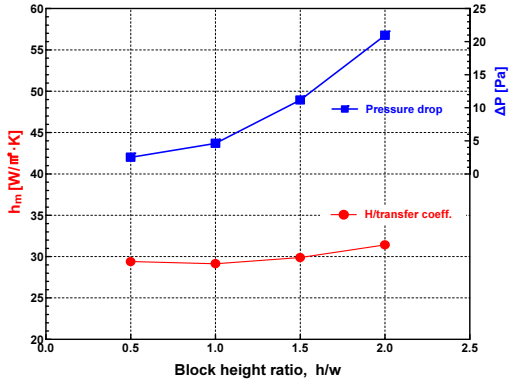
3.2.2 블록 높이비의 영향

Fig. 5와 Fig. 6은 Table 1의 적용변수인 Case 2번 조건에서 블록 높이비 h/w=0.5, 1.0, 1.5, 2.0의 변화에 따른 각 블록상면의 열전달특성, 압력강하 및 채널내의 유동장 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 Fig. 3에서 나타난 블록 폭비율(w/h)의 경우와 동일한 현상으로 1번 블록 상면에서 역 열전달현상이 발생하며, 3번 블록에서 가장 최대 열전달계수 값을 나타남을 볼 수 있다. 다만 h/w를 증가시킬수록 역 열전달현상에 의한 1번 블록 후단에서의 열전달계수 값은 증가하는 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 때, h/w가 증가할수록 열전달특성은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 블록 폭비율(w/h)에 따른 조건과 달리 블록 높이비(h/w)에 따른 조건은 동일한 블록 간격에서 블록 높이만 변화시켰기 때문에 h/w가 증가할수록 Fig. 6에서 나타난 속도벡터특성을 볼 때, 블록 후단에 나타나는 재순환유동이 선단의 블록 상부에 침투하여 영향을 주는 효과가 상대적으로 떨어지게 되어 열전달성능이 향상됨을 알 수 있었다.

결과적으로 Fig. 5(b)의 평균열전달계수와 압력강하 특성을 살펴보면, 앞서 블록 폭비율(w/h)에 따른 결과와는 달리 블록 높이비(h/w)가 증가할수록 블록 전체면을

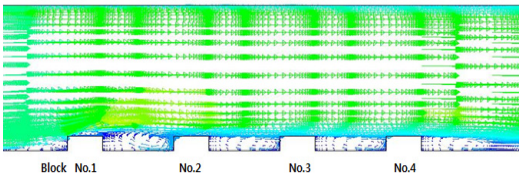


(a) Local heat transfer coefficient

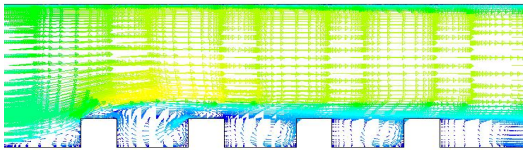


(b) Mean heat transfer coefficient & pressure drop

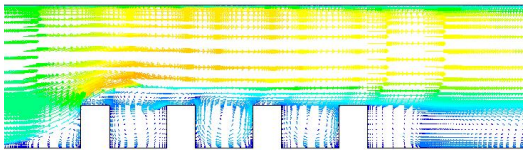
Fig. 5. Effects of block height ratio



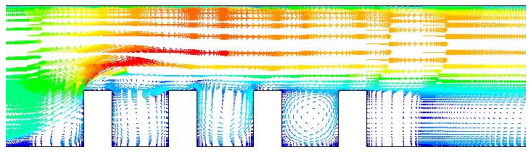
(a) Block height ratio, h/w=0.5



(b) Block height ratio, h/w=1.0



(c) Block height ratio, h/w=1.5



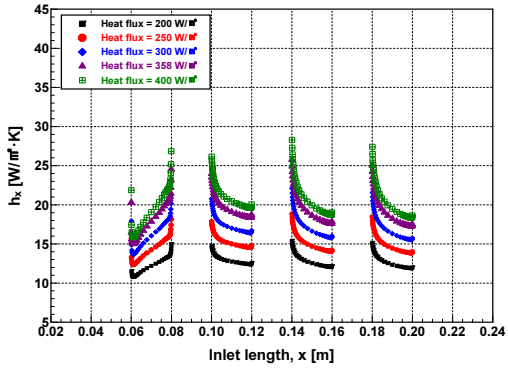
(d) Block height ratio, h/w=2.0

Fig. 6. Flow field characteristics according to block height ratio

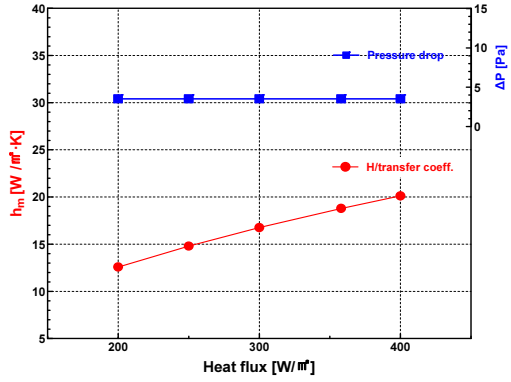
통한 총열전달률이 커지고, 압력손실이 크지 않음에도 보다 향상된 열전달성능을 보여주었다.

3.3 열유속 변화에 따른 열전달 및 압력강하

Fig. 7은 Table 1의 적용변수인 Case 3번 조건에서 기본모델(블록 폭비율 w/h=1.0)로 선정하고, 입구유속 3.84 m/s에서 각 블록표면에 열유속을 200, 250, 300, 358, 400 W/㎡로 가열했을 때, 각 블록표면의 열전달특성, 압력강하 및 채널내의 유동장 특성을 나타낸 것이다.



(a) Local heat transfer coefficient



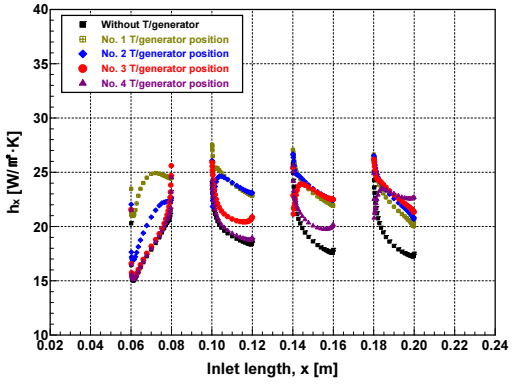
(b) Mean heat transfer coefficient & pressure drop

Fig. 7. Effects of heat flux

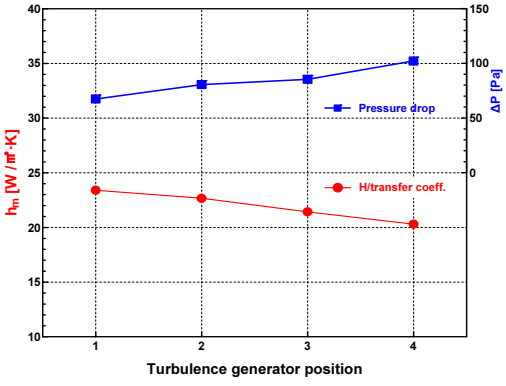
Fig. 7(a)의 국소열전달특성을 보면, 기본모델에서 나타낸 결과와 동일하게 1번 블록 상면에서 역 열전달현상이 발생하며, 3번 블록에서 가장 최대의 열전달계수 값을 나타남을 볼 수 있다. 따라서 열유속 변화에 따른 결과로 열원을 증가할수록 열전달성능이 향상되는 점을 알 수 있었다. Fig. 7(b)의 평균열전달계수와 압력강하의 특성을 살펴보면, 열유속이 증가할수록 열전달계수가 증가하나 압력강하는 기본모델에 대한 블록 형상이 동일함으로 그 차이는 거의 변함이 없음을 보였다.

3.4 난류발생기 배치의 열전달 및 압력강하

Fig. 8과 Fig. 9는 Table 1의 적용변수인 Case 4번 조건에서 기본모델(블록 폭비율 w/h=1.0)로 정하고, 입구유속 3.84 m/s와 열유속 358 W/㎡조건에서 각 블록 윗방향의 채널 내벽에 난류발생기의 배치를 No. 1, 2, 3, 4 순서대로 변경하여 배치했을 때, 각 블록상면의 열전달계수와 채널내의 압력강하 및 유동장 특성을 나타낸 것이다.



(a) Local heat transfer coefficient

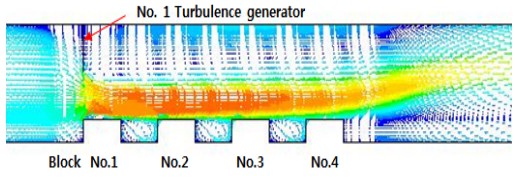


(b) Mean heat transfer coefficient & pressure drop

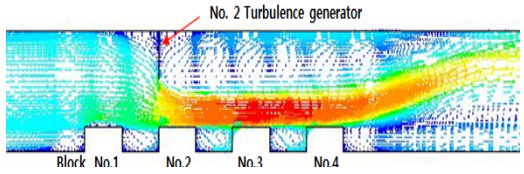
Fig. 8. Effects of turbulence generator position

Fig. 8의 열전달 및 압력강하 특성을 보면, 난류발생기(Turbulence generator)를 부착한 경우가 난류발생기를 부착하지 않은 경우에 비해 난류강도(Turbulent intensity)를 증가시킴으로써 열전달증대의 효과를 얻었으며, 압력강하도 크게 증가함을 보였다. 난류발생기 배치에 따른 열전달특성을 고찰하면, No. 1 위치의 경우는 약 20% 이상의 열전달효과를 보였으며, 순차적으로 No. 2, 3, 4번순으로 위치를 변경했을 때 점진적으로 열전달성능이 감소함을 나타내고 있다.

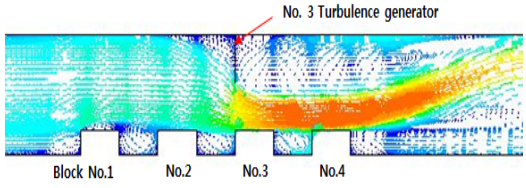
이는 Fig. 9에 나타난 속도벡터특성을 고찰하면, 난류발생기 No. 1 위치의 경우는 블록 1번 후단에 강한 유동이 발달되어 블록 2번측에 난류강도를 증대시켜 2번 블록 선단에 열전달성능을 향상시키고, 난류발생기 No. 2, 3 위치의 경우도 각 해당 블록 후단에 강한 유동을 형성



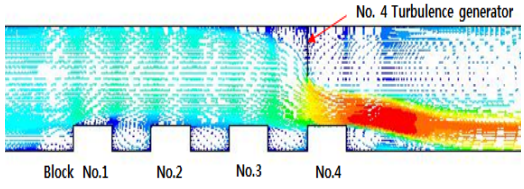
(a) No. 1 T/generator position



(b) No. 2 T/generator position



(c) No. 3 T/generator position



(d) No. 4 T/generator position

Fig. 9. Flow field characteristics according to turbulence generator position

하여 후단 블록측에 열전달을 상승시킨다. 그러나 난류발생기 No. 4위치의 경우는 블록 4번 후단에 강한 유동 형성이 발생하지만 후단에 열전달을 향상시키기 위한 추가적인 블록이 없으므로 열전달성능이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 난류발생기 No. 1 위치의 경우가 채널 입구방향에 가깝게 위치하고 있어 유동의 영향을 크게 받게 되어 4개의 가열블록 전체에 열전달효과를 증대시키지만, 난류발생기를 그 이후인 후단에 설치하는 경우는 4개의 블록 전체에 유동의 영향을 크게 주지 못하므로 열전달효과가 떨어짐을 알 수 있다. 또한 압력강하특성은 난류발생기의 위치를 채널 출구방향에 가깝게 위치할수록 채널 하부에 직접적인 영향을 받으므로 해당 블록 후단의 재순환영역의 크기가 달라지고 압력강하 특성도 달라짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 블록 크기(블록의 폭비율과 높이비), 열유속 크기 및 난류발생기 배치 등을 변화시켜 수평채널내의 열전달 및 압력강하 특성을 고찰한 내용은 다음과 같다.

(1) 난류모델의 타당성 검증을 위해 4가지 난류모델을 적용하여 민감도 분석을 수행한 결과로, SST $k-w$모델이 실험결과와 가장 근사한 해석결과를 나타냈다.

(2) 각 블록표면에 가열되는 일정한 열유속조건에서 블록 폭비율(w/h)이 증가할수록 블록 상부표면을 통한 전체 열량이 증가하게 됨으로써 오히려 열전달성능이 감소하게 나타난다.

(3) 블록 높이비(h/w)가 증가할수록 열전달서능은 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 블록 높이의 증가로 인해 유동의 저항을 받기 때문에 압력강하는 크게 나타난다.

(4) 기본 블록모델에서 블록표면의 열유속을 증가할수록 열전달계수는 증가하나 압력강하특성은 거의 변하지 않는다.

(5) 난류발생기를 블록 전단의 상단에 설치하였을 때 No. 1 위치의 경우가 4개의 가열블록 전체에 영향을 크게 미치게 되어 가장 큰 열전달효과를 보여주었고, 압력강하는 난류발생기 배치를 채널 출구방향으로 근접할수록 압력강하는 크게 나타난다.

References

[1] J. H. Kim, “CFD analysis in an electronic equipment cooling”, *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 47, No. 5, pp. 63-66, 2007.
DOI: http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00832587

[2] C. W. Park, S. I. Chang, P. W. Nam and J. Jurng, “Heat transfer and pressure drop with the turbulence promoter in a vertical PCB channel”, *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 20, No. 7, pp. 2277-2288, 1996.
DOI: http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00342951

[3] K. C. Kim, M. H. Park and J. K. Yoon, “The study on heat transfer enhancement using indirect cooling system in the channel heat source”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 321-331, 1999.
DOI: http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00673424

[4] I. H. Kim, C. H. Choi and Y. W. Kim “A study for electronic equipment cooling performance using CFD”, *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering*, pp. 546-547, 2014.
DOI: http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06141285

[5] M. Lee and T. W. Kim, “A study on the heat sink with internal structure using peltier module in the forced convection”, *Journal of the Korea Academia- Industrial Cooperation Society*, Vol. 15, No. 6 pp. 3410-3415, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.6.3410

[6] E. M. Sparrow, J. E. Niethanmer and A. Chaboki, “Heat transfer and pressure drop characteristics of arrays of rectangular modules encountered in electronic equipment”, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 7, pp 961-973, 1982.
DOI: https://doi.org/10.1016/0017-9310(82)90071-0

[7] J. R. Maughan and F. P. Incropera, “Mixed convection heat transfer with longitudinal fins in a horizontal parallel plate channel: Part I−Numerical results”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 3, pp. 612-618, 1990.
DOI: https://doi.org/10.1115/1.2910431

[8] H. M. Jeong, “Three dimensional convective heat transfer and flow characteristics in electronic equipment”, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 81-86, 1995.
DOI: http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00331346

[9] H. V. Mahaney, S. Ramadhyani and F. P. Incropera, “Numerical simulation of three-dimensional mixed convection heat transfer from an array of discrete heat sources in a horizontal rectangular duct”, *Journal of Numerical Heat Transfer,* Part A, Vol. 16, No. 3, pp. 267-286, 1989.
DOI: https://doi.org/10.1080/10407788908944717

[10] Y. Asako and M. Faghri, “Three-dimensional heat transfer analysis of arrays of heated square blocks”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.

32, No. 2, pp. 395-405, 1989.
DOI: https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90185-3

[11] Y. H. Hung and H. H. Lin, “An effective installation of turbulence promoters for heat transfer augmentation in a vertical rib- heated channel”, *International Journal of Heat Mass Transfer,* Vol. 35, No. 1, pp. 29-42, 1993. DOI: https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90005-D

[12] ANSYS Fluent Theory Guid, ANSYS Fluent v.16, 2016.

[13] M. Fiebig, A. Grosse-Gorgemann, Y. Chen and N. K. Mitra, “Conjugate heat transfer of a finned tube Part A: Heat transfer behavior and occurrence of heat transfer reversal”, *Numerical Heat Transfer,* Part A, Vol 28, pp. 133-146, 1994.
DOI: https://doi.org/10.1080/10407789508913737

서 규 원(Kyu-Won Seo) **[정회원]**

- 2015년 2월 : 가천대학교 기계·자동차공학과 (공학학사)
- 2017년 8월 : 가천대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>
열유체공학, CFD

임 종 한(Jong-Han Lim) **[정회원]**

- 1986년 2월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
열유체공학, 자동차공학

윤 준 규(Jun-Kyu Yoon) **[정회원]**

- 1987년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 명지대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
열유체공학, 자동차공학