

복합 부수로의 비정상 유동이 유발하는 난류열전달 증진에 대한 LES 해석

홍 성 호, 신 종 근*, 최 영 돈†

고려대학교 기계공학과, *한중대학교 자동차공학과

Large Eddy Simulation of Heat Transfer Performance Enhancement due to Unsteady Flow in Compound Channels

Seong-Ho Hong, Jong-Keun Shin*, Young-Don Choi†

Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Automotive Engineering, Hanzhong University, Donghae 240-713, Korea

(Received June 14, 2010; revision received December 22, 2010)

ABSTRACT: In the present article, we investigate numerically turbulent flow of air through compound rectangular channels. Large eddy simulation(LES) is employed for unsteady turbulence modeling. LES gives better predictions for the axial mean velocity distribution than those of other turbulent models. Strong large-scale quasi-periodic flow oscillations are observed in most of the geometries investigated. Such large-scale flow oscillations in compound rectangular channels are similar to the quasi-periodic flow pulsation through the gaps between fuel rod bundle in nuclear reactor. It exists in any longitudinal connecting gap between two flow channels. The frequency of this flow oscillation is determined by the geometry of the gap. The large scale cross motions through the rectangular compound channels induce significant heat transfer enhancement of the compound channel flow.

Key words: Gap(간극), Compound channels(복합부수로), Turbulent flow(난류유동), Large eddy simulation(대형와 수치모사), Heat transfer(열전달), Flow pulsation(맥동유동), Unsteady flow(비정상유동), Turbulent model(난류모형)

기 호 설 명

D_h : 시험덕트 수력직경, $4A/P$ [m]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 열전도계수, 난류운동에너지
 t : 계산시간
 T_{in} : 입구온도

T : 평균온도
 U_b : 흐름방향 평균속도
 U_x : 흐름방향 속도
 u, v, w : x, y, z 방향 요동속도
 V : 수직방향 속도
 W : 횡방향 속도
 x : 흐름방향 좌표

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-929-9290

E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

1. 서 론

간극이 있는 채널에서는 일반채널에서는 볼 수 없

는 흥미로운 유동현상을 볼 수 있다. 외부 추가동력의 도움 없이도 횡류의 진동을 유발시키며 이것은 원자로 연료 봉다발 부수로에서 발생하는 맥동유동(flow pulsation)과 유사한 구조를 보여준다. 연료 봉다발 부수로의 봉과 봉 사이에서 발생하는 맥동유동은 부수로내 강한 유동혼합을 일으키지만 원자로 부수로내 강한 유동혼합은 오랫동안 이차유동(secondary flow)에 기인하는 것으로 믿어져 왔다. 따라서 이차유동의 증진 방안에 많은 연구가 진행되어온 반면 부수로내 맥동유동에 관한 연구는 미비한 실정이다.

Lyall⁽¹⁾은 복합 부수로에서의 유동분포와 이차유동을 측정하면서 이차유동이 부수로내 강한 유체혼합을 일으키는 것을 발견하였다. Seale⁽²⁾은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용해 부수로내 열유속(heat flux)과 난류유동의 미분방정식의 전산해석을 수행하여 실험값과 비교하였다. 하지만 $k-\epsilon$ 모형은 부수로내 맥동유동을 예측하지 못하여 수치해석 결과는 실험값과의 차이를 보였다. Meyer and Rehme⁽³⁾은 열선유속계(hot-wire anemometry)를 이용하여 복합 부수로에서의 난류유동 현상을 조사하였다. 초기에 부수로의 맥동유동은 협소유로로 연결된 채널 단면적의 비대칭에 의해 발생하는 것으로 여겨졌으나, Meyer and Rehme⁽³⁾의 실험에서 서로 동일한 단면적의 채널에서도 협소유로 및 간극이 존재한다면 유체의 진동을 관찰할 수 있음을 보여주었다. 하지만 실험적 한계를 나타내면서 복합부수로에서의 협소유로 형상과 주파수 및 진동의 크기에 관한 명확한 관계를 분석하지 못하였다. 그들은 그 대안으로 LES를 이용한 수치해석을 제안하였다. Lee et al.⁽⁴⁾은 원자로의 비정상 운전시에 연료봉이 부풀거나 쪼그라들었을 때, 또는 기울어져 있을 때와 같은 위기상황에서 혼합특성 등과 같은 상황을 고려하여 서로 다른 크기의 부수로를 실험형상으로 사용하였다. 그들은 LDV(Laser Doppler Velocitometry)를 이용하여 축 방향 평균속도 및 난류요동성분을 측정하였다. 그리고 Seo et al.⁽⁵⁾은 Lee et al.의 실험과 동일한 형상에 관해서 RANS와 URANS를 이용하여 주 방향 평균속도와 맥동유동의 특성을 수치해석한 바 있다.

본 연구에서는 간극이 있는 복합 부수로에 관한 비정상 해석을 통하여 복합 부수로에서 발생하는 횡류의 진동현상을 관찰하였다. 그리고 횡류의 진동에 기인한 유동혼합과 부수로내 열전달 향상에 관한 연구를 LES를 이용하여 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 조건 및 해석형상

본 연구는 Fig. 1과 같이 두 가지 유형의 계산형상이 사용되었다. Fig. 1(a)는 원자로 연료 봉다발 집합체의 부수로를 단순화한 형상으로 협소유로에 의해 동일한 면적의 사각채널이 연결되어 있다. Fig. 1(b)는 사각채널이 간극이 있는 얇은 벽으로 나뉜 형상이다. Fig. 1(a)는 Meyer and Rehme⁽²⁾의 실험값과 비교하여 본 연구에 적용할 최선의 난류모형을 선택하기 위함이다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에서 선행된 수치해석 결과에 의해 검증된 난류모형을 이용하여 간극이 있는 채널형상의 비정상 해석을 통하여 맥동유동의 메커니즘을 분석하고 맥동유동과 부수로내 열전달에 관한 연구를 수행하기 위함이다. Table 1에 해석영역에 대한 상세한 제원을 나타내었고 수치해석은 총 5개의 해석영역에서 수행되었다. 1번 채널은 Fig. 1(a)와 같은 형상으로 Meyer and Rehme⁽³⁾의 실험과 동일하며 2~4번 채널은 Fig. 1(b)의 형상으로 간극의 너비(5~15 mm)의 변화를 주어 수치해석 하기 위함이다. 5번 채널은 협소유로나 간극이 없는 일반 사각 채널로써 맥동유동이 발생한 채널과 일반채널과의 비교를 하기 위해 채택

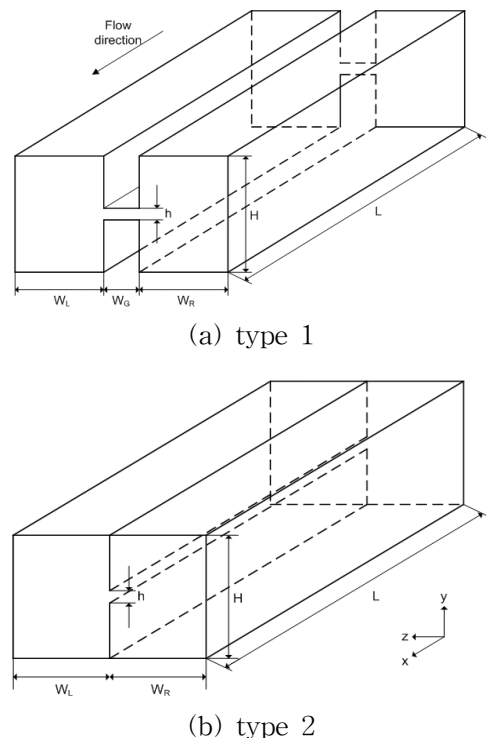


Fig. 1 Computational domain.

Table 1 Geometrical parameters at $L = 45 D_h[m]$

No.	H	W_L	W_R	W_G	h
1	0.18	0.136	0.136	0.77	0.010
2	0.18	0.136	0.136	-	0.010
3	0.18	0.136	0.136	-	0.005
4	0.18	0.136	0.136	-	0.015
5	0.18	0.136	0.136	-	-

하였다.

Meyer and Rehme⁽³⁾의 실험과 동일한 조건이 될 수 있도록 25°C의 공기를 작동유체로 사용하여 21.5 m/s의 속도로 부수로 입구에 유입시켰다. 또한 열 전달 향상에 관한 수치해석을 위해서 Fig. 2와 같이 모든 벽에는 일정한 열유속이 공급된다. 자세한 경계조건은 Table 2에 기술하였다.

2.2 격자계

본 연구는 LES를 이용하여 수치해석을 수행하였다. LES는 관성아영역의 길이규모까지 재현하기 때문에 벽면에서의 무차원 최소격자의 크기를 1이하가 되도록 하였다. 모든 격자는 사각격자로 구성되어 있으며, 협소유로 및 간극 그리고 벽 부근에 조밀격자를 분포시켰고 주유동에 따라 유동이 발달

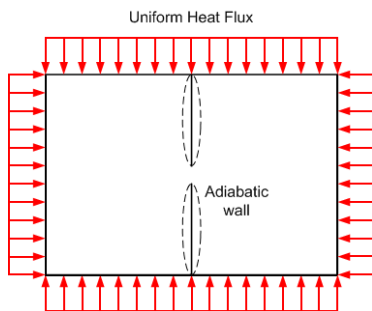
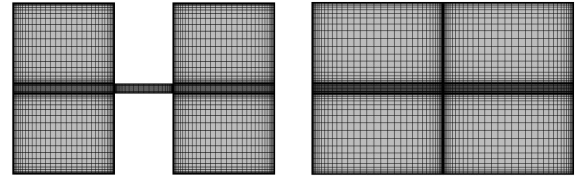


Fig. 2 Thermal boundary condition.

Table 2 Boundary conditions

Property	Unit	Value
Inlet Velocity	m/s	21.5
Inlet temperature	°C	25
Reynolds number		2×10^5
Wall heat flux	W/m^2	2000
Outlet static pressure	Pa	0



(a) Type 1 (b) Type 2
Fig. 3 Cross-section grid geometry.

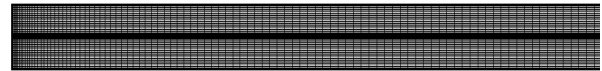


Fig. 4 Grid structure in stream wise direction.

Table 3 Node information

No	Total nodes
1	$246 \times 100 \times 130$
2	$246 \times 100 \times 100$
3	$246 \times 95 \times 100$
4	$246 \times 110 \times 100$
5	$246 \times 50 \times 70$

되는 것을 고려하여 유동입구 부분에서 역시 조밀 격자를 주었다. Fig. 3, Fig. 4 및 Table 3은 각 형상 별 계산격자의 x, y, z방향의 격자수를 나타낸다.

2.3 수치해석 기법

맥동 유동의 시간에 따른 변화를 관찰하기 위해 비정상 해석이 필요하며 정확한 수치해석을 위해서 시간간격을 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ [s]로 유지해 CFL수를 1이하가 되도록 했다. 또한 질량잔차(residual)는 1×10^{-7} 이하로 설정하였다. 수치해석을 위해서 ANSYS-CFX11⁽⁶⁾이 사용되었으며 비정상 해석의 방대한 계산량을 처리할 수 있도록 KISTI의 슈퍼컴퓨터(IBM)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축방향 속도분포

Meyer and Rehme⁽³⁾의 실험과 동일한 조건의 형상에 관한 주방향 속도분포를 비교하기 위해 Fig. 1(a)의 Type 1형상에 대해 Fig. 5의 측정경로에 따라 조사하였다. $z1 \sim z3$ 는 협소유로 주변에서 발생하는 횡류성분의 영향을 보기 위함이고, $y1 \sim y3$ 는 벽

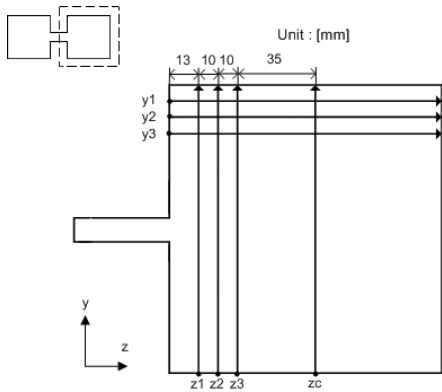


Fig. 5 Path lines for axial mean velocity comparison.

부근에서의 주방향 속도분포(U_x)를 보기 위함이다. 등방성 난류모형인 SST(Shear Stress Transport)모형⁽⁷⁾과 레이놀즈응력 모형인 SSG모형⁽⁸⁾에 의한 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)기법과 LES

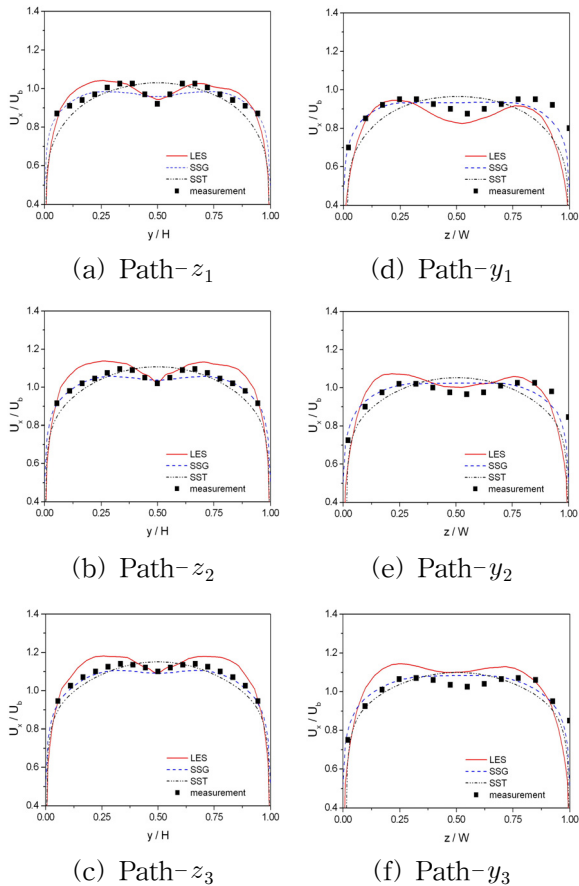


Fig. 6 Distributions of the normalized axial mean velocity(U_x/U_b) along the measuring path lines.

(Large Eddy Simulation) 기법에 의해 각각 수치해석을 수행하여 실험값과 비교하였다.

Fig. 6은 각 난류모형에 따른 수치해석 값을 Meyer and Rehme⁽³⁾의 실험값과 비교하여 나타낸 것이다. 실험값은 협소유로 부근에서 주기적인 횡류의 진동 성분의 영향을 받아 주방향속도가 오목하게 감소하고 있다. SST와 SSG 모형은 협소유로 부근에서의 주방향 속도 경향을 정확히 예측하지 못하고 있는 반면 LES는 가장 정확하게 협소유로 부근의 주방향 속도의 경향을 예측하고 있으며 벽영향도 가장 잘 반영하고 있다. 따라서 Fig. 1(b)의 Type 2의 형상을 해석하여 맥동유동과 열전달 사이의 관계를 도출하기 위해서 LES를 이용하기로 한다.

3.2 속도벡터

본 절에서는 Fig. 1(b)의 Type 2 형상을 이용하여 수치해석을 수행한 결과를 나타내었다. Fig. 7은 맥

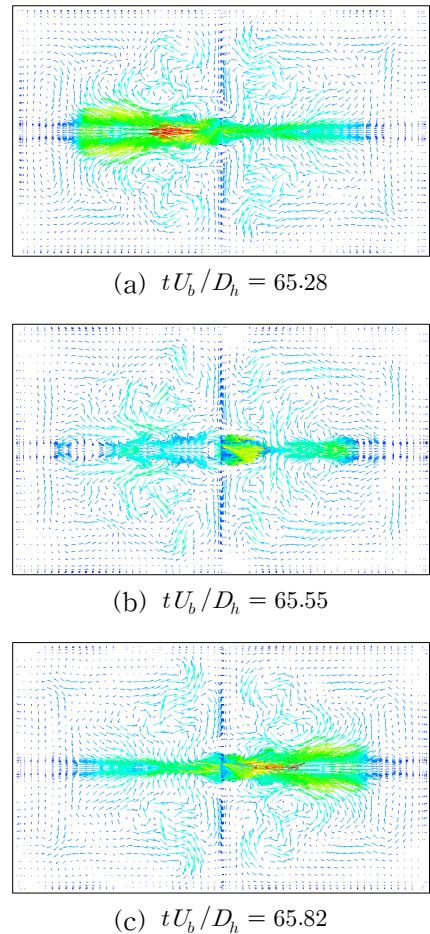


Fig. 7 Time variation of flow pattern in the cross section($x = 40D_h$).

동의 경향을 확인하기 위해 간극이 있는 채널(channel No. 2)의 완전발달 된 영역의 단면에서의 속도 벡터($\sqrt{V^2 + W^2}$)를 시간에 따라 나타내었다. 속도 벡터를 보면 간극을 중심으로 횡 방향으로 유동이 좌우로 진동하고 있으며 간극 주변으로 유동의 혼합을 일으키고 있음을 알 수 있다.

3.3 난류운동에너지

속도벡터의 변화에 따른 난류운동에너지($k = 1/2(\overline{u^2 + v^2 + w^2})$)는 평균 벽마찰속도(τ_{av} averaged wall shear stress)에 의해 무차원하여 Fig. 8에 나타내었다. 난류운동에너지도 시간에 따라 좌우로 그 크기가 변화한다. 이와 같이 부수로간 난류운동에너지 크기의 비대칭성은 횡방향으로 힘을 발생시켜 간극을 중심으로 횡류를 유발시킨다.

3.4 주파수 분석

앞에서 본 바와 같이 복합부수로의 유동은 간극을 중심으로 횡 방향의 주기적인 진동을 유발시키는 것을 확인할 수 있었다. 간극의 너비가 맥동주파수에 주는 영향을 확인하기 위해 서로 다른 간극의

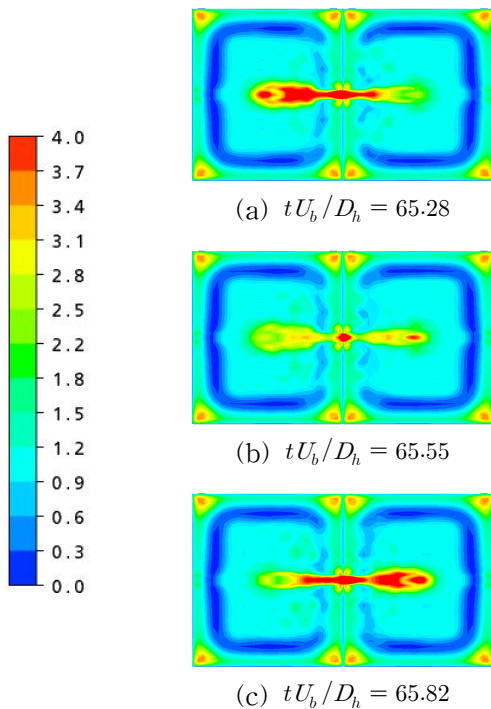


Fig. 8 Time variation of turbulent kinetic energy in the cross section($x = 40D_h$).

너비(5~15 mm)를 가지는 부수로(channel No. 2~4)에 대해서도 수치해석을 수행하였다. 각 부수로 간극의 중심에서 횡방향 속도(W)를 조사하여 주방향 평균속도(U_b)로 무차원화 하여 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림으로부터 횡방향 속도의 크기는 주방향 속도의 약 20%에 달하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에 관하여 FFT를 이용한 주파수 분석을 수행하여 Fig. 10에 나타내었다. 주파수 분석 결과 간극의 너비는 주파수 및 그 크기(amplitude)에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 간극의 너비가 좁을수록 횡 방향 속도의 크기 및 최고 주파수(peak frequency)가 커지고 있다.

이것은 간극의 너비가 좁을수록 간극을 통과하는 유체의 속도가 높아지기 때문이다. 간극의 너비에 따른 최고 주파수는 Table 4에 정리하였다.

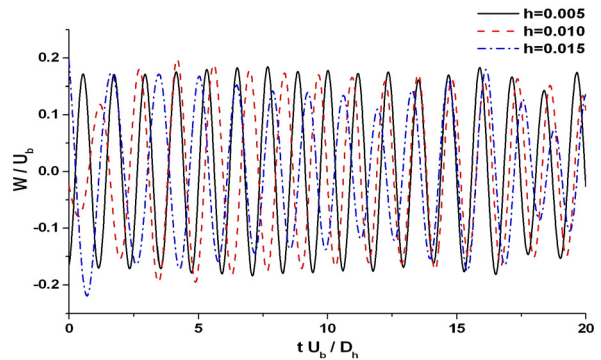


Fig. 9 Time trace of the normalized lateral velocity.

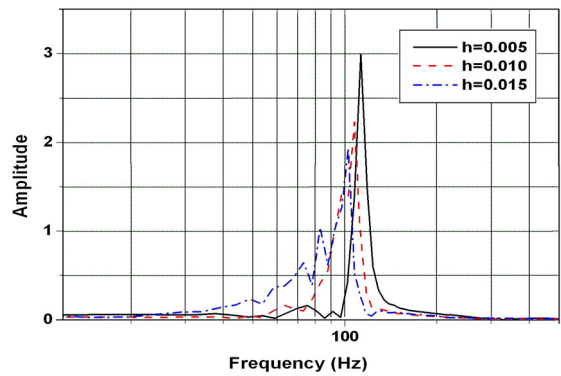


Fig. 10 The pulsatile frequency with respect to gap width(h) using FFT.

Table 4 Peak frequency(f_p) with respect to width(h)

h	0.005	0.010	0.015
f_p	112.7	107.1	103.9

3.5 열전달

본 절에서는 간극이 있는 부수로의 맥동유동이 복합 부수로의 열전달 향상에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 11은 간극 및 격벽이 없어 맥동유동이 발생하지 않는 일반채널과 맥동유동이 발생하는 간극이 존재하는 채널에 관하여 완전 발달된 영역 단면의 유체 온도분포를 나타낸 것이다. 맥동유동이 발생하는 채널은 간극이 존재하지 않는 일반채널에 비해 유동단면 전체에서 유체온도의 분포가 전반적으로 균일함을 볼 수 있다. 이것은 맥동유동으로 인한 강한 유동혼합에 기인한다. 유체 온도의 균등화는 전체적인 열전달 성능을 향상시키고 열점(heat pot)의 생성을 억제시킨다.

Fig. 12는 시간경과에 따른 부수로 벽면의 평균 온도를 나타낸 것이다. 유동 초기 시간대에는 맥동의 크기가 작기 때문에 열전달 향상에 대한 효과가 발생하지 않지만 시간이 경과하면서 맥동이 점차

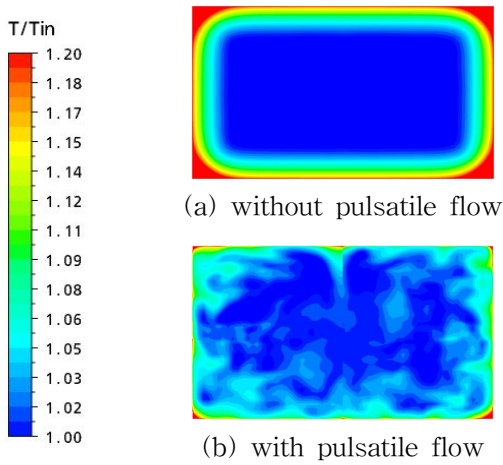


Fig. 11 Comparison of fluid temperature distributions at $L/D_h = 40$.

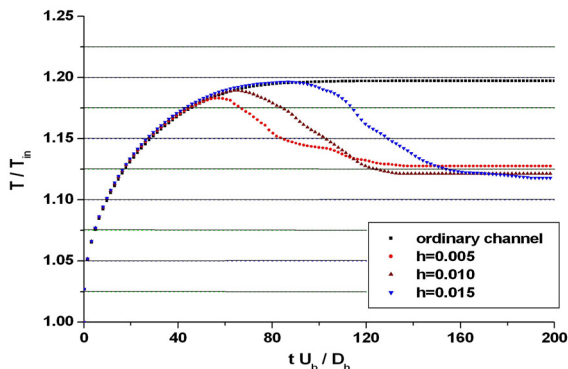


Fig. 12 Overall mean temperature of wall.

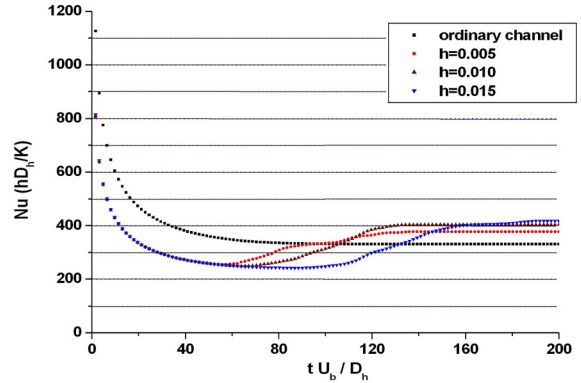


Fig. 13 Overall mean Nusselt number of wall.

Table 5 Heat transfer enhancement

h(gap width) [m]	0.005	0.010	0.015
Enhancement [%]	20.1	28.1	32.6

발달되면 부수로에서 냉각효과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기서 간극이 좁은 부수로부터 냉각효과가 발생하는 것은 간극이 좁을수록 맥동유동이 일찍 발생하기 때문이다. 시간이 충분히 흐른 뒤에 간극이 있는 채널과 일반채널간의 온도차이는 현저하게 나타난다.

열전달 향상을 보기 위해 Fig. 13에 시간경과에 따른 누셀트 수를 나타내었다.

유동 발달 초기에 일반채널이 간극이 있는 채널보다 누셀트수가 높은 것은 누셀트수($N = hD_h/k$)는 수력직경(D_h)에 비례하기 때문이다. 시간이 경과하면서 간극이 있는 채널의 누셀트 수가 일반채널보다 현저히 높아지고 간극이 큰 채널일수록 열전달 성능이 좋은 것으로 나타났다. 이것은 간극이 클수록 간극을 통과하는 유량이 많기 때문이다. Table 5에서 볼 수 있듯이 간극이 있는 채널이 일반채널에 비해 약 20~30% 정도 열전달향상 효과가 있었다.

4. 결 론

본 연구에서 간극이 있는 채널에서는 맥동유동이 발생하며 이것은 열전달 향상에 효과적인 것을 확인했다. 간극이 좁을수록 주파수는 높게 나타났으며 열전달은 간극이 넓어질수록 향상되었다. 간극이 있는 채널은 그 구현이 쉬워 쉽게 산업적으로 응용이 가능할 것으로 사료된다. 하지만 간극이 넓어질수록 열전달 향상의 정도는 둔화되고 있는 것은 간극이 넓어질수록 주파수가 작아지기 때문이

다. 따라서 간극의 크기와 열전달향상이 비례한다고 볼 수는 없다. 간극의 형상에 따른 맥동유동특성 및 열전달에 대한 보다 정확한 관계를 도출하기 위해서는 더 많은 형상에 대한 수치해석이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터(KSC-2009-S01-0006)의 지원을 통해 수행되었음.

참고문헌

1. Lyall, H. G., 1971, Measurement of flow distribution and secondary flow in ducts composed of two square interconnected subchannels, Symp. on Internal Flows, Salford, UK, E16-E23.
2. Seale, W. J., 1979, Turbulent diffusion of heat between connected flow passage, part2 : prediction using the $k-\epsilon$ turbulent model, Numerical Engineering and Design, Vol. 54, pp. 197-209.
3. Meyer, L. and Rehme, K., 1994, Large-scale turbulence phenomena in compound rectangular channels, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 8, pp. 286-304.
4. Lee, C. M., Yang, S. K., Chun, S. Y., Chung, M. K., and Rhim, Y. C., 1998, Experimental study on turbulent mixing in two parallel channels, Proc. of the KSME(B), pp. 604-609.
5. Seo, J. S., Shin, J. K. and Choi, Y. D., 2008, The flow pulsation of a compound rectangular channel, JSME-KSME 7th Thermal and Fluids Engineering Conference, p. 35.
6. CFX-11 Solver Theory, Ansys Inc., 2007.
7. Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R., 2003, Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, Proc. Turbulence, Heat and Mass Transfer, Vol. 4, pp. 625-632.
8. Speziale, C. G., Sarkar, S. and Gatski, T. B., 1991, Modeling of the pressure-strain correlation tensor : an invariant dynamical systems approach, J. Fluid Mech., Vol. 227, pp. 245-272.