

직접수치모사를 통한 Wavy Channel 내의 난류 유동 구조의 연구

이대성[†] · 하만영* · 윤현식** · 전호환** · 전충환*

The study of turbulent flow structures in a wavy channel using direct numerical simulation

Dae Sung Lee, Man Yeong Ha, Hyun Sik Yoon, Ho Hwan Chun and Chung-hwan Jeon

Key Words : Wavy channel, Turbulent flow(난류), DNS(직접수치모사)

Abstract

Sinusoidal wavy channel is one of the most commonly used devices in the industry for achieving mixing and heat transfer. Here we report on results obtained from the DNS of flow inside the wavy channel performed using the finite volume technique. As a primary stage to obtain the optimal design for heat transfer and mixing, this study observed the basic flow structures in a wavy channel. The mass flow rate is kept constant with friction Reynolds number of $Re_\tau = 140$. Time- and space-averaged and instantaneous flow fields are illustrated to observe the flow structures. Although the direct comparison of results between turbulent wavy and flat channel is somehow difficult due to the different flow phenomena derived from different configuration, here the mean streamwise velocity and RMS of velocities at same Re_τ of two different channels are compared. The basic difference between wavy and flat channel flow is the existence of small scale wall vortices along the walls in a wavy channel. These vortices make flow more complex, which will accompany the increase of heat transfer, pressure drop and drag.

1. 서 론

열 교환기의 성능을 개선하기 위해, 유로의 형상에 많은 연구가 수행되었다. 그 중 하나가 유동의 instability를 증가시키고 열전달을 많이 향상시키는 corrugated wall channel이다. 일반적으로 corrugated wall channel은 날카로운 모서리를 가지는 삼각형의 구조물이 반복적으로 있는 형상을 의미한다. 같은 형상으로 둥그런 모서리를 가지는 것을 wavy channel이라고 한다.⁽¹⁾ Sparrow and

Hossfeld⁽²⁾는 둥근 모서리를 가진 형상이 열전달과 압력 강하 사이의 균형 측면에서 날카로운 모서리를 가진 형상보다 낫다고 결론지었다. 즉, 적절한 Nusselt number의 감소와 마찰계수의 더 많은 감소를 얻는다.

Jiehai et al⁽³⁾은 층류 영역에서 ($10 \leq Re \leq 1000$)에서 wavy channel의 형상의 유동과 열전달에 대한 영향을 수치 계산을 통하여 연구하였다.

T.A. Rush et al⁽⁴⁾은 층류 영역에서 유동과 열전달에 대해 wave의 진폭, 위상차, 벽과 벽 사이의 간격에 의한 영향을 실험적으로 연구하였다. 층류 영역에서 그림 1과 같은, 아래 위 wave의 위상차가 0° 인 wavy channel이 180° 인 것보다 상류에서 불안정성을 발생시키고 열전달을 향상시킨다.

Wavy channel의 난류 유동을 실험적인 방법

[†] 부산대학교 대학원 기계공학과
E-mail : moo16@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3090 FAX : (051)512-9835

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 첨단조선공학 연구센터

과 수치적인 방법으로 연구한 논문은 주로 한 쪽 벽면만 wavy wall이고 위 벽은 평평한 것으로 두어 그림 1 과는 형상이 다르고, 대부분 진폭도 채널 폭에 비해 작다.⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾

본 연구에서는 직접수치모사를 사용하여 등근모서리를 가진 wavy channel의 난류 유동에 관해 연구하고자 한다.

2. 지배방정식

물성치가 일정한 비압축성 유체의 난류 채널유동에 대한 해석을 위하여, 아래의 무차원화된 운동량 및 연속 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \bar{u}. \tag{2}$$

무차원화를 위한 특성 길이는 채널 폭의 1/2인 δ 를 사용하였다. 일반적으로 채널내부의 난류유동의 연구에서는 벽면 전단속도인 u_τ 가 특성속도로 사용된다. 따라서, 무차원 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{u_\tau \delta}{\nu}, \quad y = \frac{y^*}{\delta}, \quad u = \frac{u^*}{u_\tau}, \quad t = \frac{\delta}{u_\tau}.$$

여기서 *는 차원변수를 나타낸다.

3. 수치 해석 방법

Figure 1은 x, y 및 z 좌표계에서의 wavy 채널의 형상을 보여준다. 각 방향에 대응하는 속도는 u, v 및 w이다. 완전히 발달된 난류 채널 유동에 x방향과 폭(z) 방향들에는 주기 조건을 부여하였다. 그리고 상하 벽면들에는 점착조건을 부여하였다.

본 계산에서는 9개의 CPU를 사용하여 병렬계산을 수행하였다. 유동장에 대한 수치해석은 유한체적법을 기반으로 일반화 좌표계를 사용하였고, 비 엇갈림 격자계를 도입하였다. 계산 영역의 크기는 $3\pi(L) \times 2\delta \times \frac{4}{3}\pi(H)$ 이고, $96 \times 97 \times 96$ 개의 격자를 이용하여 $Re_\tau = 140$ 에서 유동을 계산하였다. 물리적 계산 영역의 좌표(x,y)는, 일반화 좌표계(ξ, η)에서, 다음과 같이 정의된다.

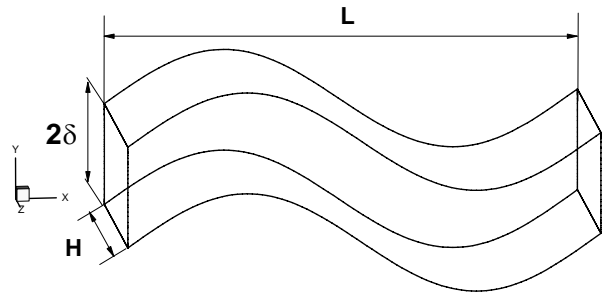


Figure 1. Schematic diagram of computational domain

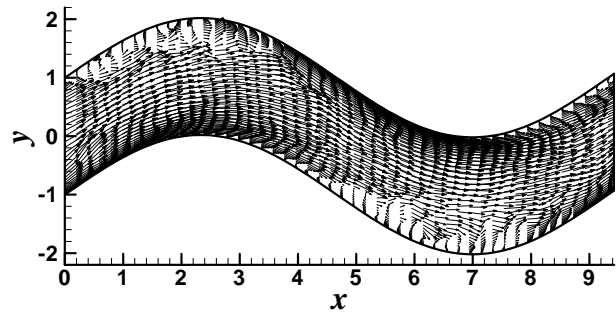


Figure 2. Instantaneous velocity vectors in the (x,y)-plane.

$$\xi = (x/\delta), \quad \eta = [(y - \sin(2\pi\xi/L))/\delta],$$

$$0 \leq x \leq 3\pi, \quad -1 \leq y \leq 1, \quad 0 \leq z \leq \frac{4}{3}\pi \tag{3}$$

시간 차분에 대해서는 time-splitting, 공간 차분은 2차 중앙차분법을 적용하였다. 점성항에 대해서 Crank-Nicolson 방법, 대류항에 대해서 2차 Adams-Bashforth 방법을 사용하였다. $Re_\tau = 140$ 을 맞추기 위하여 질량유량을 고정시켰다.

4. 결과 및 고찰

4.1 순간 유동장

Figure 2 는 x-y 평면에서의 순간 속도 벡터를 보여주고 있다. 채널의 아래 crest 를 따라 올라가는 곳에서 유동은 가속되어 경계층이 얇아지고, crest 를 지나면서 감속되어 경계층이 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. x=4 근처에서 역압력 구배가 생겨 박리가 일어난다. 박리가 일어난 후 벽면을 따라서

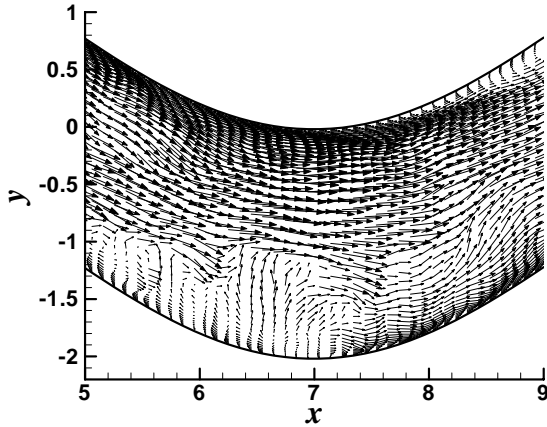


Figure 3. Instantaneous velocity vectors near the trough in the (x,y)-plane.

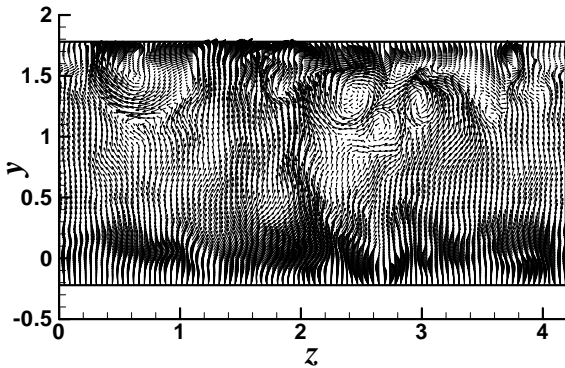


Figure 4. Instantaneous velocity vectors at crest in the (y,z)-plane

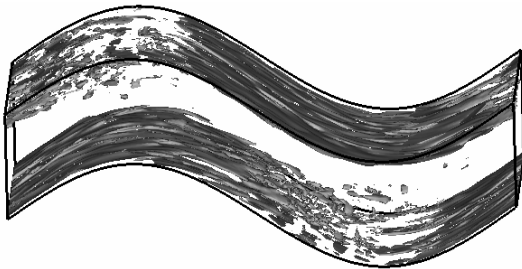


Figure 5. Iso-surface of instantaneous x-direction vorticity

작은 스케일의 벽 와들에 의한 전단층이 이루어진다. 채널의 아래 trough 를 지나 압력이 회복되면 유동은 다시 가속된다. Figure 2에서 알 수 있듯이, 채널의 위 벽면에서의 유동은 같은 (y-z) 단면에서 질량 보존을 만족 시키기 위해서 위에서 설명된 아래벽면에서의 유동 패턴에 상응하는 패턴을 보여주고 있다.

Figure 3에서는 P. Cherukat et al⁽⁶⁾ 에서 언급되어 있는 velocity burst 현상을 볼 수 있다. 즉, 박리 이후에 작은 스케일의 벽 와들에 의해서 생성된 전단층은 $x \approx 6.4$ 근처에서의 상대적은 큰

y-방향 속도에 의해서 붕괴된다.

Figure 4 는 crest 근처에서 순간 속도 벡터를 x 평면에 투영시킨 그림이다. Figure 2에서 알 수 있듯이 유동이 가속되는 영역으로, v 속도가 지배적인 아래 벽에서는 와가 발생하지 않는다. 그러나 위 벽면에서는 박리 이후에 생성된 작은 스케일의 와들에 의해서 복잡한 유동 패턴을 보여주고 있다.

Figure 5는 순간 x-방향 vorticity의 iso-surface를 보여준다. 아래 벽면에서 박리가 일어나기 전의 유동이 가, 감속되는 영역에서는 긴 띠 모양의 와들이 박리가 일어나기 전 지점까지 안정적으로 분포된다. 박리가 일어난 후에는 벽에서부터 작은 스케일의 와들이 생성되면서 유동의 불안정성이 벽에서 위(y)로 전파되면서 작은 와들이 복잡하게 분포되어져 있는 것을 볼 수가 있다.

4.2 평균 유동장

Figure 6은 시간과 폭 방향으로 평균된 u 속도의 contour를 보여준다. 순간 속도장에서 볼 수 있듯이 아래 채널의 crest를 따라 지나는 부분에서 속도 구배가 크고 trough로 갈수록 속도 구배가 작아진다. U의 최대값은 crest에 위치하고, 최소값은 이에 대응하는 위 벽면에 있다. 아래, 위 벽면에서의 속도 분포는 crest와 trough를 기준으로 대칭적인 모습이 나타난다.

Figure 7은 시간과 폭 방향으로 평균된 v 속도의 contour를 나타낸다. V의 최소값은 crest와 trough에 위치한다. V의 최대값은 crest와 trough의 중간 지점에서 trough에 약간 가까운 지점에 위치하는 것을 볼 수가 있다. u 속도의 분포와 같이, 아래, 위 벽면에서의 v 속도의 분포도 crest와 trough를 기준으로 대칭이다.

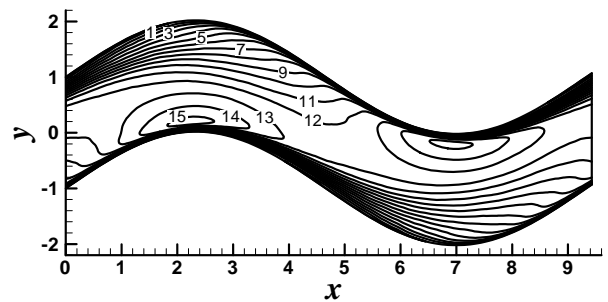


Figure 6. Time- and space-averaged (z-direction) u velocity contour in the (x,y)-plane

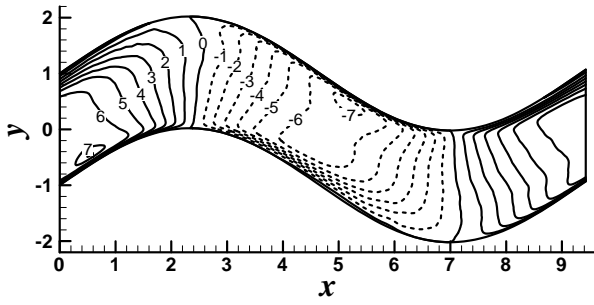


Figure 7. Time- and space-averaged (z-direction) v velocity contour in the (x,y) -plane

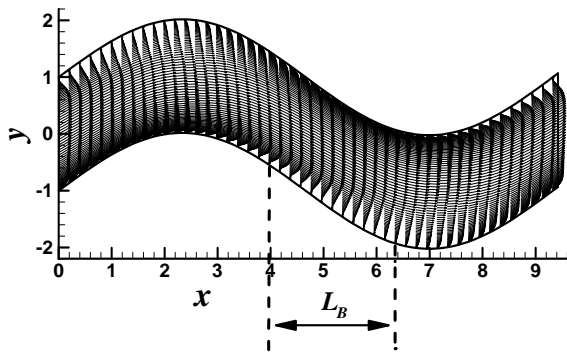


Figure 8. Time- and space-averaged (z-direction) velocity vectors in the (x,y) -plane

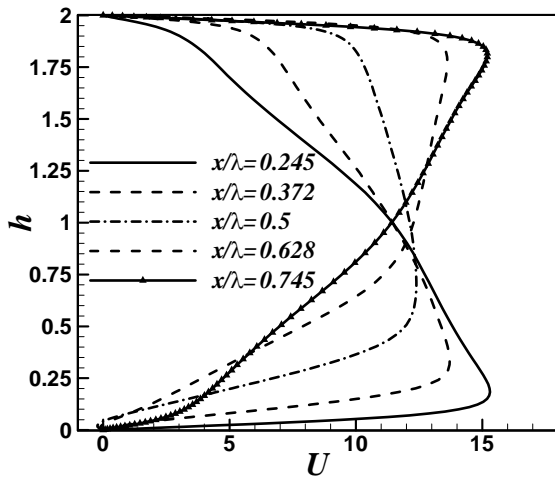


Figure 9. Time- and space-averaged (z-direction) u velocity profiles at different x positions.

Figure 8은 시간과 폭 방향으로 평균한 속도의 vector를 나타낸다. 평균 separation bubble의 길이는 $L_B \approx 2.4$ 이다. 평균적으로 박리는 crest의 정점을 지난 $x \approx 4$ 에서 일어나는 것을 알 수가 있다.

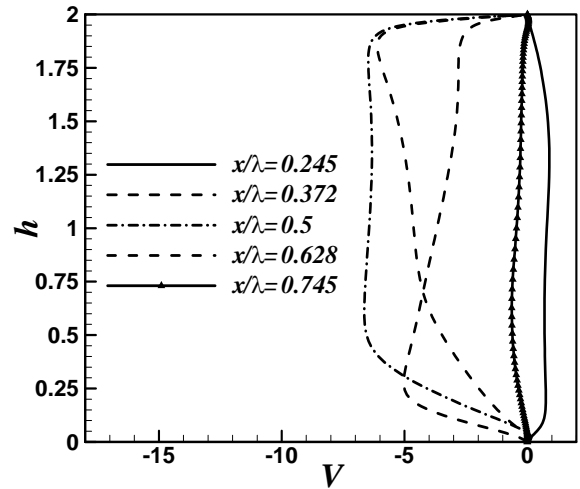


Figure 10. Time- and space-averaged (z-direction) velocity vectors at crest in the (y,z) -plane

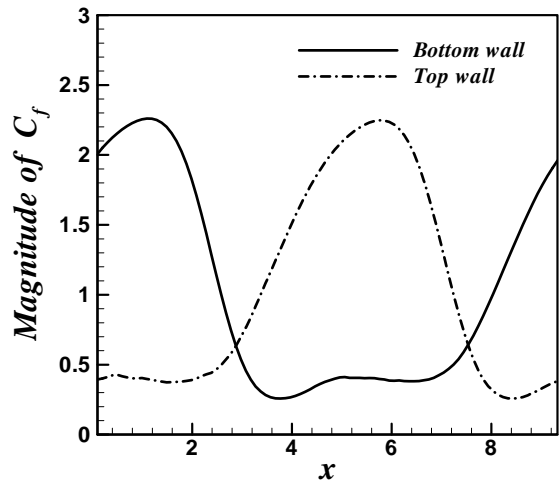


Figure 11. Time- and space-averaged (z-direction) magnitude of C_f .

Figure 9는 시간과 폭 방향으로 평균한 u 속도의 profile을 나타낸다. 여기서 h 는 채널의 아래 벽에서 y 방향으로의 거리를 나타낸다. $x/\lambda=0.245$ 는 crest이며 $x/\lambda=0.745$ 는 trough이다. 순간 속도장과 평균 속도장에서 보았듯이 crest에서 채널의 아래 벽에서의 u 속도의 구배는 크고 위 벽에서의 구배는 작다. 또한, crest에서 trough으로 갈수록 경계층의 두께가 증가하는 것을 알 수가 있다. Crest에서의 속도 profile은 trough에서의 속도 profile과는 대칭을 이룬다.

Figure 10은 폭 방향으로 평균한 v 속도를 나타낸다. Crest ($x/\lambda=0.245$)와 trough ($x/\lambda=0.745$)에서 v 속도의 크기가 다른 위치 보다 작다. Crest를 지나 trough로 내려가는 곳에서의 v 속도 이므로

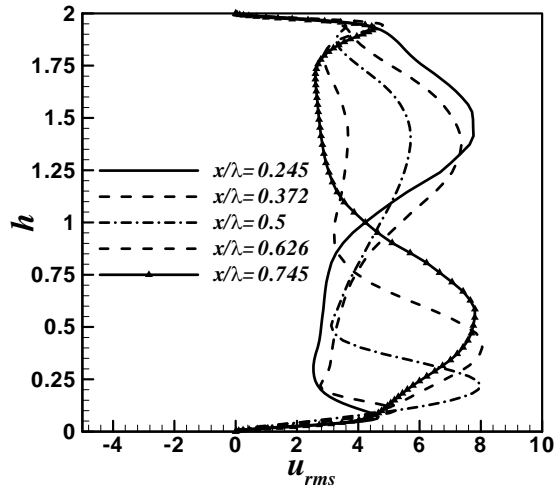


Figure 12. Time- and space-averaged (z-direction) root-mean-square of u velocity fluctuations.

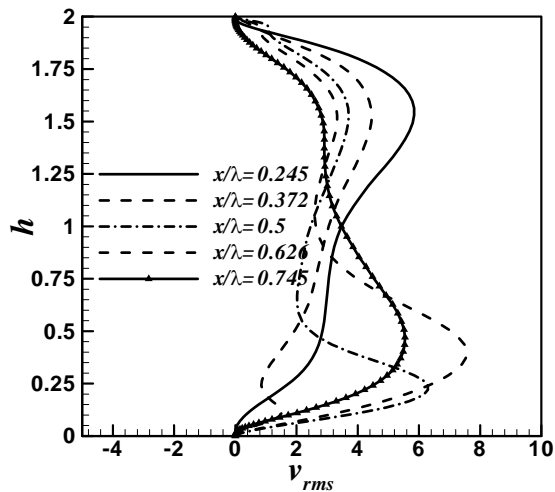


Figure 13. Time- and space-averaged (z-direction) root-mean-square of v velocity fluctuations.

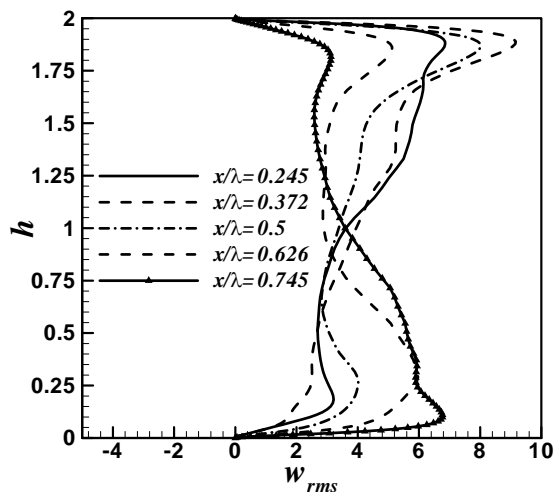


Figure 14. Time- and space-averaged (z-direction) root-mean-square of w velocity fluctuations.

양에서 음의 속도로 바뀌고, 절대값은 커졌다가 다시 작아진다.

Figure 11은 시간 및 폭 방향으로 평균된 C_f 값의 크기를 나타낸다. 위에서 보여준 순간 과 평균 속도장으로부터 예측 할 수 있듯이 crest 근처에서 최대값을 가지고, crest를 지나면서 급격히 감소하여 박리점에서 최소값을 가진다. 박리점 이후에 다소 증가하여 trough 근처에서는 다소 일정한 값의 분포를 보여주고 있다.

4.3 난류 통계량

Figure 12는 시간과 폭 방향으로 평균한 u_{rms} 값을 나타낸다. Crest ($x/\lambda=0.245$) 에서는 채널의 아래 벽에서부터 중심까지는 일반적인 채널의 경향과 비슷하다. 그러나, y -방향의 채널의 중심에 대해서 위 반 평면에서는, 위 벽면에서 생성된 작은 스케일 와들에 의한 불안정으로 아래 반 평면에서의 섭동값에 비해 상대적으로 크다.

Figure 13과 14은 시간과 폭 방향으로 평균한 v_{rms} 와 w_{rms} 값을 각각 나타낸다. v_{rms} 및 w_{rms} 는 아래, 위 반 평면에서 u_{rms} 와 비슷한 경향을 보여준다. 각 벽면 근처에서는 w_{rms} 가 v_{rms} 보다 큰 것을 알 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 $Re_\tau = 140$ 인 wavy channel의 유동장을 직접 수치모사를 통해 해석하였다. Wavy channel에서는 형상에 의해 생기는 역압력 구배 때문에 박리가 일어나고 재 부착하여 유동이 복잡해진다. 순간 유동장에서는 채널의 crest 와 trough에서 와가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Crest에서 y 방향의 큰 속도를 가지는 유동이 생기는 velocity burst 현상을 볼 수 있었다.

평균 유동장은 crest에서의 채널의 중심의 위 영역과 trough에서의 채널 중심의 아래 영역은 형상뿐만 아니라 속도장, 난류강도 등이 대칭을 이룬다.

후기

본 연구는 NRL, BK21 과 인력양성사업의 지원을 받아 이루어졌다.

참고문헌

- (1) N. Saniei, S. Dini, 1993, "Heat Transfer Characteristics in a Wavy-Walled Channel," ASME J. Heat Transfer, 115, pp. 788
- (2) Sparrow, E. M., and Hossfeld, L. M., 1984, "Effect of Rounding of Protruding Edges on Heat Transfer and Pressure Drop in a Duct," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 10, pp. 1715-1723.
- (3) Jiehai Zhang, Jaydeep Kundu, Raj M. Manglik, 2004, "Effect of fin waviness and spacing on the lateral vortex structure and laminar heat transfer in wavy-plate-fin cores," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 1719-1730.
- (4) T. A. Rush, T.A. Newell, A.M. Jacobi, 1999, "An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 42, pp. 1541-1553.
- (5) Jefferey Buckles, Thomas J. Hanratty, Ronald J. Adrian, 1984, "Turbulent flow over large-amplitude wavy surfaces," J. Fluid Mech., vol. 140, pp. 27-44.
- (6) P. Cherukat, Y. Na, T.J. Hanratty, J.B. McLaughlin, 1998, "Direct Numerical Simulation of a Fully Developed Turbulent Flow over a Wavy Wall," Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 11, pp. 109-134
- (7) Kim, J. and Moser, R., 1987, "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number," J. Fluid Mech., vol. 177, pp. 133-166
- (8) Lee, D. and Choi H., 2001, "Magnetohydrodynamic turbulent flow in a channel at low magnetic Reynolds number," J. Fluid Mech., vol. 439, pp. 367-394