

임계 레이놀즈 수 이하에서 웨이비핀의 각도에 따른 크로스 컷팅이 압력강하에 미치는 영향 분석

이태경^{1*}, 김건우¹, 이광훈¹
서울시립대학교 기계정보공학과¹

초 록

이번 연구에서는 Ali & Ramadhayni[2]에 의해 실험된 corrugated fin에 Cross-Cutting을 하여 압력강하를 2-D Laminar 영역에서 분석하였다. 분석 지표로는 Pressure drop의 무차원화된 지표인 friction factor를 사용하였고, corrugation angle을 10°, 20°, 30°로 변화 시켜가며 진행하였다. Cross-Cutting의 길이는 $0.3D_h$ 길이로 고정시켜 계산하였고, 모든 값은 $D_h = 2l$ 로 무차원화 하였다. Corrugated Fin의 경우, Corrugation Angle에 따라 층류영역에서 주기성을 가진 vortex shedding이 일어나는데, 그 때의 레이놀즈 수를 본 연구에서는 임계 레이놀즈 수라 하고, Vortex Shedding이 일어나기 시작하는 Re_{cr} 이하에서 연구를 진행하였다.

Key Words : 웨이비 핀(Wavy Fin), 열교환기(Heat Exchanger), CFD

1. 서 론

Corrugated fin type의 열교환기는 일반적인 Straight fin type의 열교환기보다 열전달 면적이 넓고, 유동을 제어함으로써 열전달의 효율을 높여 주는 것으로 알려져 있다. 하지만, 형상에 기인하여 압력강하가 높다. 지금까지 많은 연구자들이 Corrugated Fin의 특성에 대해 연구하였고, 열전달 효율을 높힐 수 있는 방안에 대해서 연구가 진행되어져 왔다. Kays and London[1]은 heat exchanger의 성능을 분석하는 지표로 j factor와 f factor를 사용하였다. Ali and Ramadhayni[2]는 Corrugated Channel에서의 열전달 성능 및 압력강하를 실험적으로 진행하였고, 이를 j factor 및 f factor를 통해 나타내었다. 뿐만 아니라, 이를 visualization을 통하여 층류구간의 특정 reynolds 수 이상에서 주기적인 vortex shedding이 일어남을 확인하였다. Comini et al.[3,4]는 이러한 Corrugated Channel을 수치 해석적으로 연구하였는데, 1개의 Corrugated fin을 anti-symmetric boundary condition을 통해 space ratio와 Corrugated Angle을 Reynolds Number를 다르게 하

여 case study를 하였고, 이 세 개의 독립변수들 사이의 최적의 값이 존재할 것임을 언급하였다. 다른 유동제어를 통해 열전달을 높인 fin에는 Offset-Strip fin이 있다. Offset-Strip fin은 열 경계층을 재생성 시킴으로써 열전달 효율을 높였지만, 압력강하는 그만큼 크다. Manglik[5]은 이러한 Offset-Strip fin에서의 열전달과 압력강하를 correlation을 통해 나타내었다. Tae Young Kim and Sung Jin Kim[6]은 또 다른 방법으로 plain fin에서 cross-cut에 의한 열전달 효과를 연구하였다. 하지만, 현재까지 유동제어를 통한 Corrugated Fin의 분석에 관한 내용은 많지 않다. 따라서, 본 연구에서는 현재까지 연구된 Corrugated Fin Type의 열교환기에서의 Cross-Cutting을 통한 압력강하 분석을 하고자 한다.

2. 수치해석 대상 및 방법

2.1 수치해석 대상

수치해석 대상은 Ali & Ramadhayni[2]의 실험과 같

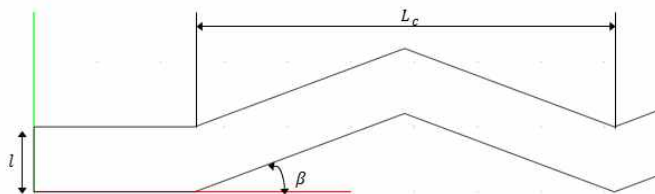


figure 1. 수치해석 대상의 Geometry

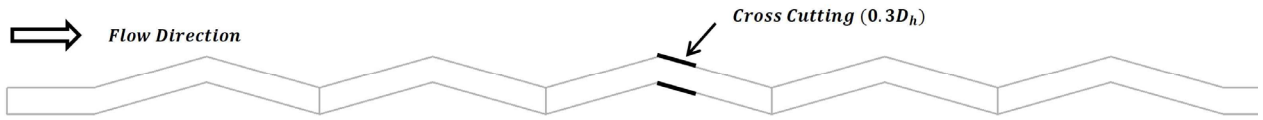


figure 2. Simulation Geometry

은 조건에서 2-Dimensional 계산을 통해 유동을 관찰 하였다. 모든 계산은 특성길이(D_h)로 무차원화된 값을 사용하였으며, 특성길이는 Ali & Ramadhyani[2]의 실험에서 사용한 특성길이를 2차원화한, Comini et al.[3,4]에서 정의한 값인 $D_h = 2l$ 을 사용하였다. space ratio라고 불리는 fin pitch/wave length(l/L_c)는 0.15로 고정하였으며, 총 5개의 wave에서 해석을 진행하였고, 1개의 wave의 길이는 $L_c = 3.312$ 이다. Ali & Ramadhyani[2]와 같은 조건으로 해석하기 위하여 입구 길이와 출구길이를 각각 1.267, 1.035만큼을 주었고, Corrugation Angle(β)은 10° , 20° , 30° 3가지의 case에 대하여 연구를 진행하였다. 이번 해석에서 사용된 Cross-Cutting의 길이는 $0.3D_h$ 값으로 고정하였다.

각 block 사이에서는 block communication 경계조건

을 입력하였고, 입구와 출구는 각 subsonic-inlet, subsonic outlet 경계조건을 주었다. 벽 부분에서는 Viscous Adiabatic Wall 조건을 주었다.

2.2 지배방정식

모든 Conservation equation은 무차원화 되어 계산되었다.

$$\frac{\partial u_j^*}{\partial x_j^*} = 0$$

Incompressible Mass

$$\frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*}$$

Momentum

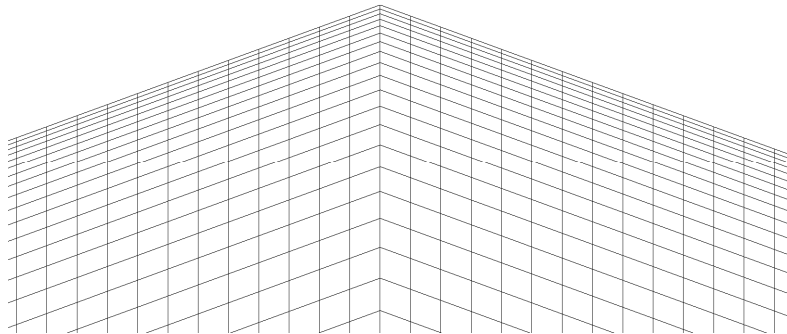


figure 3. Grids for Near Wall

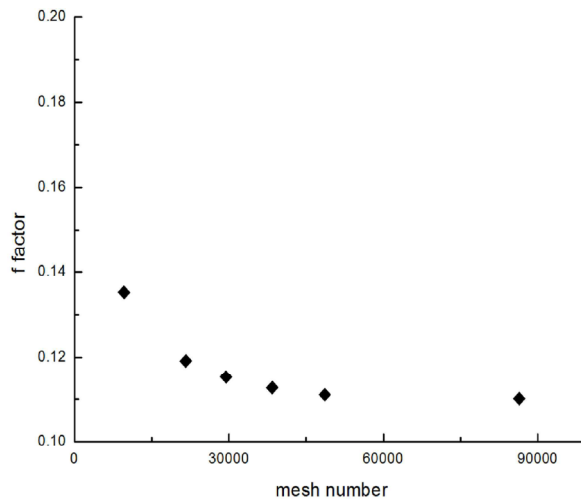


figure 4. Re=400, Grid Dependency Test

2.3 격자의존성테스트

1개의 Block은 axis 별로 500개의 격자가 최대이기 때문에, 전체 해석 영역을 5개의 block으로 나누어서 진행하였고, block 사이에서는 block communication 조건을 주었다. 층류 영역에서는 velocity profile이 난류모델링에 의한 해석보다 gradient가 크기 때문에, 벽 근처에서의 격자를 조밀하게 넣어주었다. $Re = 400$ 에서 1개의 wave에서의 fin pitch 방향과 wave length 방향으로 1:4의 비율로 증가시키며 격자 의존성 테스트를 진행하였고, 비교대상인 값인 f factor의 값의 표준편차(Standard Deviation)가 1%미만이 될 때까지 진행하였다. 격자 48,600개와 86,400개 일 때의 Std.이 1% 미만이기 때문에 격자는 48,600개의 격자를 사용하였고, figure 4.에 나타내었다.

2.4 Validation

해석 대상의 타당성을 확인하기 위하여 $Re = 200, 300$ 일 때의 결과 값을 Ali & Ramadhyani[2]의 실험에 의해 구한 f factor의 결과와 비교하였다. f factor는 pressure drop을 무차원화한 비교지표로서 활용되어지고, 다음과 같이 구할 수 있다. 이 때 L^* 는 전체 corrugated fin의 길이를 무차원화한 값이고, D_h, U_{inlet}^2 은 모두 무차원화된 값을 사용하여 최종적으로는 간단한 식을 사용할 수 있다.

$$f = \frac{\Delta P / L}{\rho U_{inlet}^2 / 2} \frac{D_h}{4} = \frac{\Delta P^*}{2L^*}$$

Validation의 결과는 figure 6.에 나타내었다. Ali & Ramadhyani[2]의 실험에 의한 결과와 거의 비슷한 경향성을 보였다. Ail & Ramadhyani[2]의 실험이 약

Mesh Number	friction factor	Std.(%)
9600	0.1352339	
21600	0.1191462	11.896206
29400	0.1153004	3.2278184
38400	0.1127767	2.1888027
48600	0.1110525	1.5287985
86400	0.1101612	0.8026134

figure 5. Grid Dependency Test: Std 비교

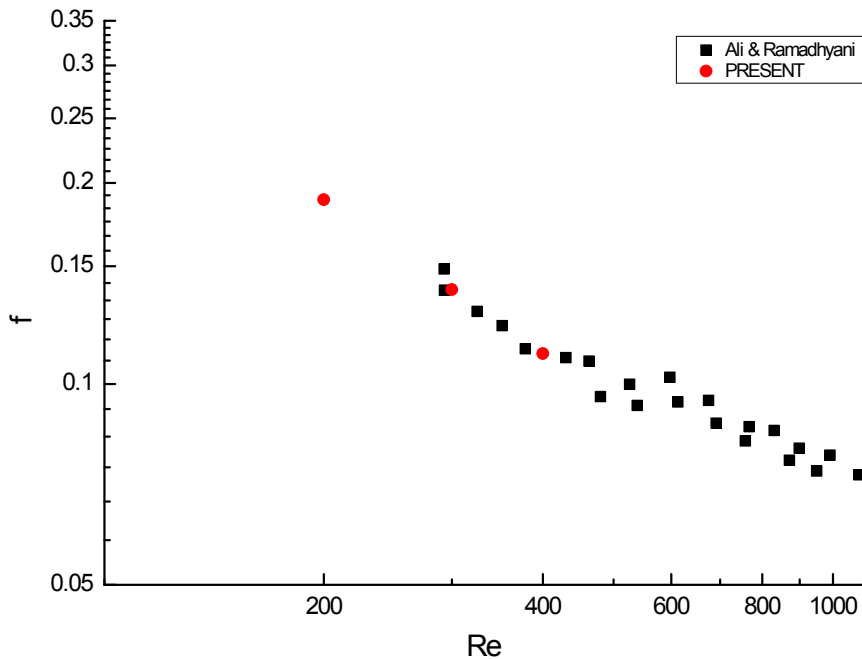


figure 6. Ali & Ramadhyani의 실험값과의 validation

Space Ratio H/L	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$
0.15	above 510	510	340

figure 7. Corrugation Angle 별 임계 레이놀즈 수 (Comini et al.[3])

제4회 EDISON 사업 SW활용 경진대회 및 성과전시회 | 전산열유체

$Re = 300$ 에서부터 진행하였기 때문에, $Re = 200$ 이하에서의 결과는 예측에 의존할 수 밖에 없는데, 이 역시 비슷한 경향성을 보임을 알 수 있다. Figure 7.에서

보는 것처럼 Wave의 peak이후에 recirculation zone이 생성됨을 볼 수 있다. 이러한 재순환 영역에서는 열전달이 효과적으로 일어나지 않는다. 따라서 이번 해석에

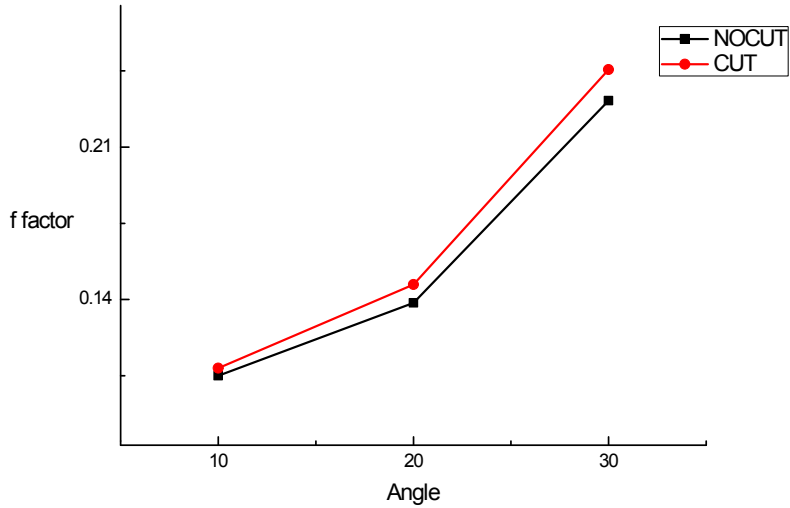


figure 8. $Re=300$, Corrugation Angle에 따른 f factor 비교 (1)

Corrugation Angle	NOCUT	CUT	상승률(%)
10°	0.104991	0.108512	3.35371
20°	0.138444	0.146915	6.11882
30°	0.231272	0.245588	6.19040

figure 9. $Re=300$, Corrugation Angle에 따른 f factor 비교 (2)

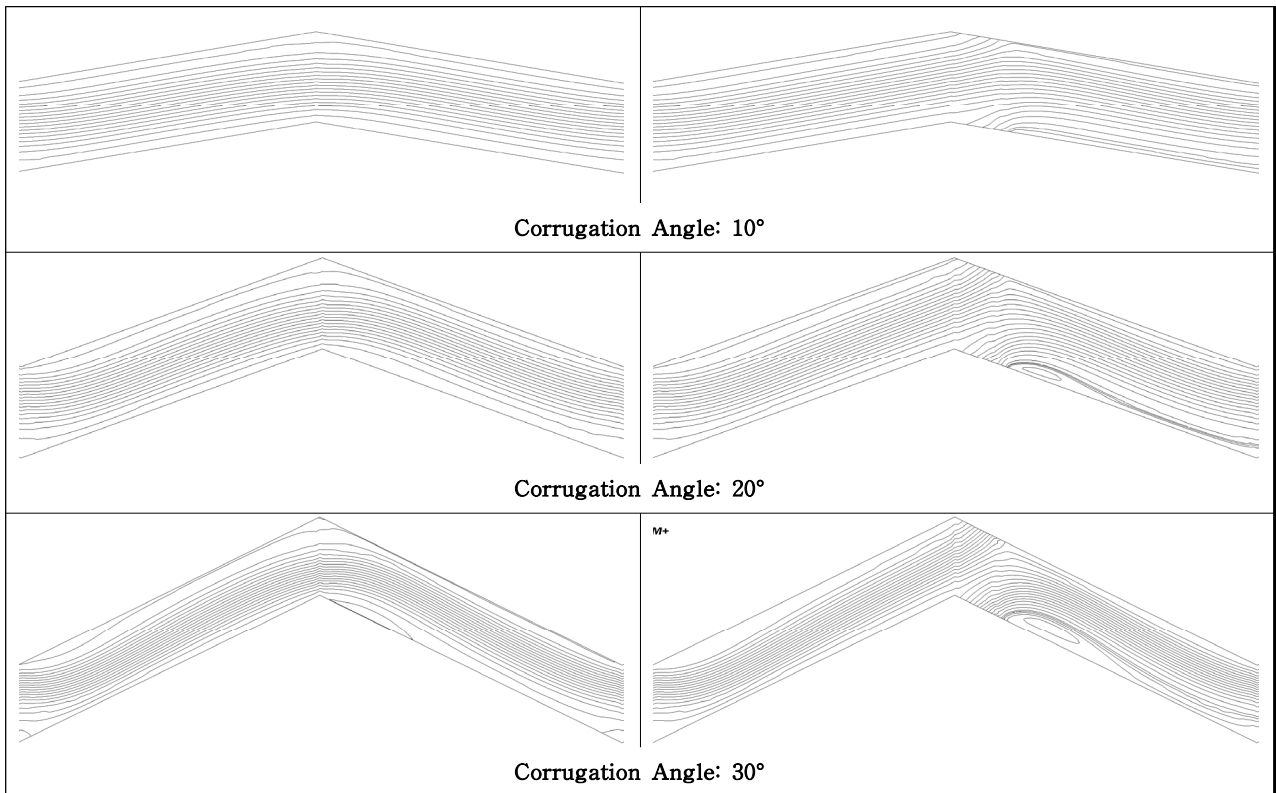


figure 10. $Re=300$, StreamLine, NOCUT(left) / CUT(right)

Angle Reynolds	10°			20°		
	NOCUT	CUT	상승률(%)	NOCUT	CUT	상승률(%)
300	0.104991	0.108512	3.35371	0.138444	0.146915	6.118829
400	0.077337	0.080981	4.711646	0.111053	0.117831	6.103537
500	0.067808	0.071691	5.726577	0.100468	0.110021	9.508062

figure 11. 레이놀즈 수 별 f factor의 비교(10°, 20°)

서는 3번째의 wave의 peak 부분에서 Cross-Cutting을 진행하여 그 결과를 비교해보고자 한다.

3. 결과 분석

전산 실험 수행은 Comini et al.[4]에 의해 알려진 Vortex Shedding이 일어나는 임계 레이놀즈 수 Re_{cr} 이하에서 수행되었다. 임계 레이놀즈 수는 Corrugation Angle에 따라 다르게 제안되어 있고, 이는 figure 7에 상기된 논문에서 밝혀하였으며, Corrugation Angle이 10°인 경우는 20°인 경우보다 높을 것임을 감안하여 계산하였다. 따라서 Re 가 300인 경우, 10° - 30°까지의 Angle을 비교하고, Re 가 400, 500인 경우, 10°, 20°의 경우만 비교한다.

figure 8과 figure 9를 통해 모든 경우에서 Cutting을 한 경우, f factor가 증가함을 볼 수 있다. 하지만, Corrugation Angle에 따라 f factor의 상승폭은 다르다. $Re=300$ 일 때, Angle이 10°인 경우, cutting에 의해 약 3.35%의 f factor 증가를 볼 수 있는 반면, Angle이 20°가 넘어가게 되면 그 상승폭은 6% 이상으로 커지게 된다. 이는 Corrugation Angle이 커짐에 따라 교란되는 유동이 cutting으로 인해 다음 row의 fin으로 일부 찢어지기 때문에 속도 바운더리 레이어가 재생성되기 때문에 압력강하가 커지는 것이라고 생각할 수 있다.

figure 10에 Stream Function을 이용하여 계산한 streamline을 그렸다. 오른쪽의 Cutting된 fin을 비교해보면, angle이 10°일 때에는 cutting에 의해 재순환영역

이 생기지 않음을 볼 수 있다. 하지만, Angle이 커짐에 따라 재순환 영역이 커지게 됨을 볼 수 있는데, 이는 압력강하가 커지게 됨을 의미하게 된다. 하지만, 유선의 분포를 보면 Cutting으로 인해 나가는 유량이 Angle이 커짐에 따라 많아지게 됨을 볼 수 있다.

figure 11에서 Reynolds 수가 커질 때, Cutting에 의한 압력강하가 대체적으로 커짐을 볼 수 있다. 하지만, Corrugation Angle이 20°일 때, $Re=300 \rightarrow 400$ 에서 상승률의 폭이 약간 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 Cutting에 의해 적은 압력강하와 큰 유동교란을 얻고자 할 때, Angle과 Reynolds수가 f factor 상승률에 서로 연관이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

전산 실험 수행은 Comini et al.[4]에 의해 알려진 Vortex Shedding이 일어나는 임계 레이놀즈 수(Re_{cr}) 이하에서 Corrugation Angle을 10°, 20°, 30° 으로 바꾸어 f factor를 분석하였다. Corrugation Angle이 작은 경우에는 대체적으로 재순환영역이 생기지 않음을 볼 수 있었다. Angle 또는 Reynolds 수가 커짐에 따라 재순환 영역이 커짐을 볼 수 있었다. Cutting에 의해 압력강하 상승률이 대체적으로 커짐을 볼 수 있었으나, 20°에서는 그 상승률이 약간 작아짐을 볼 수 있었다. 이를 통해 Cutting을 통해 유동교란을 하고자 할 때, Corrugation Angle, Reynolds 수에 영향이 있음을 알 수 있었다. 향후 연구는 임계 레이놀즈 수 이상의

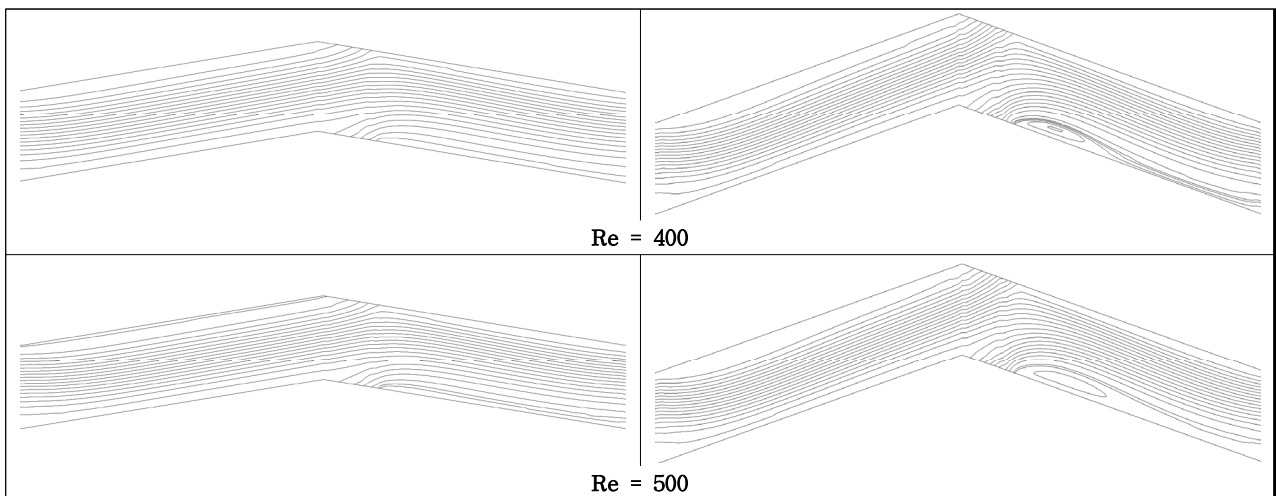


figure 12. 레이놀즈 수 별 Cutting Fin의 Streamline, 10°(left) / 20°(right)

Cutting된 fin에서 Vortex Shedding에 의한 열전달 효과 분석할 예정이다.

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557).

참고문헌

- [1] W. M. Kays, A. L. London, 1984, "Compact Heat Exchangers, 3rd", ed. McGraw-Hill, New-York
- [2] M. M. Ali and S. Ramadhyani, 1992, "Experiments on convective heat transfer in corrugated channels", *Experimental Heat Transfer*, vol. 5, pp.175-193
- [3] G. Comini, C. Nonino and S. Savino, 2002, "Convective heat and mass transfer in wavy finned-tube exchangers", *international journal of numerical methods for heat & fluid flow*, vol. 12 Iss 6, pp 735-755
- [4] G. Comini, C. Nonino and S. Savino, 2002, "Effect of space ratio and corrugation angle on convection enhancement in wavy channels", *international journal of numerical methods for heat & fluid flow*, vol. 13 Iss 4, pp 500-519
- [5] M. Manglik and E. Bergles., 1995, "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Rectangular Offset Strip Fin Compact Heat Exchanger", *Exp. Therm. Fluid Sci.* 10(2), 171-180
- [6] Tae Young Kim. and Sung Jin, Kim., 2009, "Fluid flow and heat transfer characteristic of cross-cut heat sinks", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, pp. 5358-5370