

# 기울어진 타원형 딴플이 부착된 냉각 유로에 대한 열전달 성능해석

김 현 민, 문 미 애, 김 광 용\*

인하대학교 기계공학부

## HEAT-TRANSFER ANALYSIS OF A COOLING CHANNEL WITH INCLINED ELLIPTICAL DIMPLES

H.M. Kim, M.A. Moon and K.Y. Kim\*

Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

*This paper deals with a parametric study on inclined elliptical dimples to enhance heat transfer in a channel. Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are solved to estimate flow and heat transfer in dimpled channel. As turbulence closure, the low-Re shear stress transport model is employed. Two non-dimensional geometric variables, dimple ellipse diameter ratio and angle of main diameter to flow direction are selected for the parametric study. The inclined elliptical dimples show higher heat-transfer performance but with higher pressure drop compared to the circular dimples. And there is an optimum inclination angle that gives the maximum heat transfer.*

**Key Words :** 딴플(Dimple), 냉각 유로(Cooling channel), 누셀트 수(Nusselt Number), 열전달(Heat Transfer), 삼차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식(Three-Dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)

### 1. 서 론

딴플(Dimple)은 반구형 홈의 형태가 일반적이며 주기적으로 벽면에 설치되어 열전달 증진을 위해 사용된다. 열전달면에 평행하게 유동이 진행될 때, 딴플 내부 상류측에 재순환 와류가 생성되고 하류측에는 유동의 재부착이 이루어짐으로써 열전달이 크게 상승하는 현상이 발생된다. 딴플에 의해 생성된 난류는 대류열전달을 촉진시킨다. 딴플은 일반적으로 열교환기, 전자 제품 냉각 및 터빈 블레이드 내부 냉각 유로에서 사용되며, 리브(Rib), 핀핀(Pin-Fin), 돌출(Protrusion) 등과 같은 유동 간섭물과는 달리 유동방향으로의 흐름을 방해하지 않아 압력손실이 작다는 장점을 갖는다.

딴플에 의한 유동장 및 열전달 특성을 알아보기 위한 연구들이 여러 연구자들에 의해 수행되었다. Hwang 등[1]은 딴플

과 돌출에 대해 실험적 연구를 수행하여 열전달 및 유동 특성을 비교하였다. 딴플은 돌출에 비해 낮은 열전달 강화 효과를 나타내는 반면에, 낮은 압력 강하를 가진다고 보고하였다. Mahmood 와 Lignari[2]는 유동가시화 실험을 통해 딴플 유로의 높이 변화에 따른 유동장 특성에 대해 연구하였다. 딴플 유로의 높이가 감소함에 따라 딴플에 의한 와류 생성이 더욱 활발하게 발생하고 이와 함께 열전달이 크게 증가함을 보였다. Ligrani 등[3]은 실험을 통해 딴플 깊이 변화에 따른 영향을 연구하였으며, 딴플 깊이가 증가함에 따라 열전달 성능이 강화된다고 보고하였다. Elyyan 등[4]과 Isaev와 Leont'ev[5]는 딴플이 설치된 냉각 유로에 대해 수치해석을 수행하였다. 딴플 깊이가 깊어짐에 따라 열전달이 증가함을 보였으며, 특정한 딴플 깊이에 도달하였을 때에 열전달 및 유동장 특성이 변한다고 보고하였다. Samad 등[6]은 앞선 연구를 바탕으로 딴플의 지름, 깊이 그리고 간격 변화를 변수로 하여 열전달과 압력 강하를 동시에 개선하기 위한 딴플 형상의 최적화 연구를 수행하였다. 최적화 결과로 열전달과 압력 강하 각각에 대해 최적화된 두 가지 형상을 제시하였는데 각각 열전달이 2.6배 향상되고, 압력 강하가 40% 감소하는 성과를 거두었다.

기존의 원형 딴플 외에 다양한 형상을 지니는 딴플에 대한

Received: January 25, 2011, Revised: January 30, 2012,  
Accepted: February 2, 2012.

\* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.1.001>

© KSCFE 2012

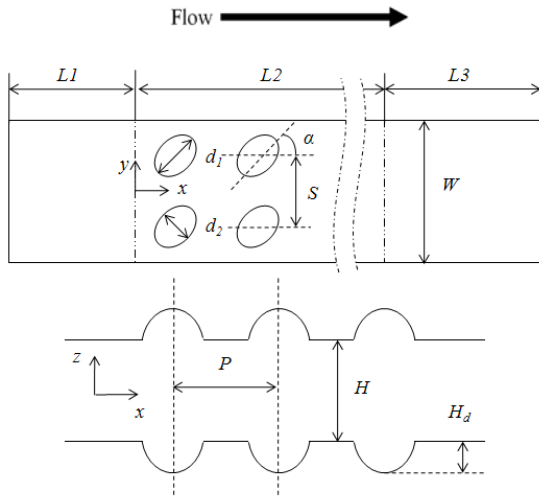


Fig. 1 Geometric parameters and flow domain

연구 또한 활발하게 진행되었다. Moon과 Lau[7]는 원형 땀플과 실린더 형태의 땀플에 대해 연구를 수행하여, 실린더 형태의 땀플이 원형 땀플에 비해 열전달 효율이 더욱 좋다고 보고하였다. Park와 Ligrani[8]는 8개의 다양한 땀플 형상에 대해 수치해석을 수행하였다. 그 결과 각도를 가지는 실린더 형태의 땀플이 가장 높은 열전달을 보임을 밝혔다. Silva 등[9]은 층류 영역에서 원형 땀플과 타원형 땀플에 대해 연구를 수행하였다. 타원의 장축이 유동 방향과 수직일 때와 수평일 때를 비교하여, 타원의 장축이 유동 방향과 수직인 경우에 더 높은 열전달 성능을 보인다고 보고하였다. 타원 모양의 땀플을 나선형으로 배치한 원형 냉각 유로에 대해 Vicente 등[10]은 실험적 연구를 수행하였다. 땀플의 깊이와 땀플 간격의 변화에 따른 열전달 및 압력 강하 특성을 비교 분석하였고, 그 결과 땀플의 깊이가 커짐에 따라 열전달 성능 및 압력손실이 함께 증가하였으나, 땀플 간격은 큰 영향을 미치지 않는다고 보고하였다.

이상과 같이 지금까지는 땀플에 대한 기본적인 유동 구조 및 열전달 특성, 그리고 압력 강하에 관한 연구가 주로 진행되었다. 아울러, 원형 땀플 외에 실린더형 및 타원형과 같은 다양한 형태의 땀플에 대해서도 실험 및 수치해석적 연구가 많이 진행되었다. 그러나 각도를 지니는 타원형 땀플이 설치된 냉각 유로의 열전달 성능 및 압력 강하에 대한 수치해석적 연구는 아직 수행된 바가 없다.

이에 따라 본 연구에서는 삼차원 유동해석 방법을 이용하여 유동방향에 대해 기울어진 타원형 땀플들이 설치된 냉각 유로의 열전달과 유동특성을 알아보았다. 타원의 장축과 단축의 지름비( $d_2/d_1$ )와 타원의 장축과 유동방향의 각도( $\theta$ )의 변화

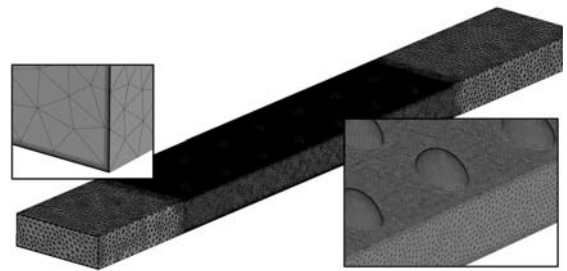


Fig. 2 Example of grid system

에 따른 열전달 및 압력 강하 특성을 비교분석하였다.

## 2. 유동해석방법

Fig. 1은 본 연구의 대상인 유로의 구조 및 형상 변수를 나타내고 있다. 유로의 종횡비( $W/H$ )는 3.0이며, 수력 직경은 22.5mm이다. 7 열의 총 14개의 땀플을 평행하게 설치하였다. 냉각 유로의 높이와 땀플의 평균 지름의 비( $H/d_a$ )는 1.155, 땀플의 깊이와 땀플 평균 지름의 비( $H_d/d_a$ )는 0.250, 땀플 평균 지름과 땀플 유동방향 간격비( $d_a/P$ )는 0.500 그리고 측면방향 땀플 간격과 땀플 유동방향 간격비( $S/P$ )는 1.000으로 고정하였다. 입구는 땀플구간이 시작되는 부분에서 60mm 앞에 위치하며( $L1$ ), 출구와 땀플구간이 끝나는 부분의 거리 ( $L3$ )는 80mm이다.

본 연구에서는 삼차원 Reynolds-averaged Navier- Stokes 방정식을 이용하여 땀플 유로의 유동 및 열전달 특성을 해석하였다. 비정렬 격자계를 사용하는 상용코드인 ANSYS CFX 11.0[11]를 이용하여 해석을 수행하였으며, 난류를 해석하기 위한 난류모델로는 SST(Shear stress transport)[12] 모델을 사용하였다. SST모델은 k- $\epsilon$ 모델과 k- $\omega$ 모델을 가중합수를 사용하여 결합한 모델이다. 두 모델의 장점을 살릴 수 있도록 벽 근처에는 k- $\omega$  모델이 사용되고 그 이외의 영역에서는 k- $\epsilon$ 모델이 사용된다. SST모델은 k- $\epsilon$ 과 k- $\omega$ 모델 사이 난류전단응력의 전달을 고려하여 역압력 구배로 인한 유동 박리의 예측에 상당히 효과적이다.

작동 유체로 25°C 공기를 사용하였다. 경계조건으로 입구에 유로의 수력직경을 바탕으로 한 레이놀즈수가 10,000이 되도록 균일 유속을 설정하였으며, 출구에는 정압력(0pa) 조건을 설정하였다. 땀플이 설치된 영역의 벽면에 일정 열유속 조건( $600W/m^2$ )을 주었으며, 모든 벽면(땀플이 설치된 상·하면과 y방향 벽면)에 점착 조건(No-slip condition)을 설정하였다. 수치해석을 위한 격자계는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 비정렬 사면체 격자를 사용하였다.

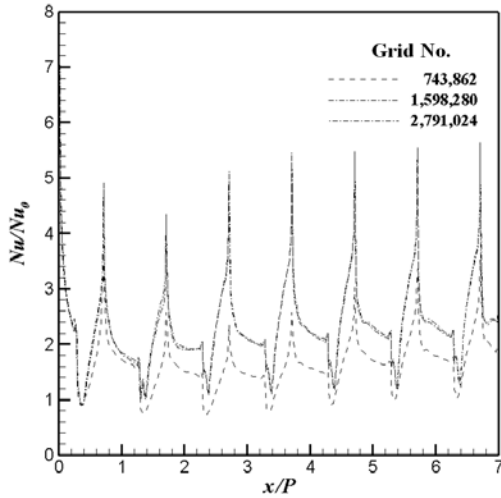


Fig. 3 Grid dependency test: Nusselt number along streamwise centerline of dimples ( $y/S=0.5$ )

수치해석의 타당성을 검증하기 위해 원형 댐플이 부착된 Case1에 대하여 격자수 약 700,000~2,700,000 사이에서 격자의 존성 시험을 수행하여 Fig. 3에 나타내었다. 댐플 중심을 지나 는 선에서의 국부 누셀트수 분포를 비교하였으며, 약 160만개 이상의 격자수 이상부터 격자 의존성이 없어짐을 확인할 수 있다. 이에 따라 약 160만개의 격자수를 최적 격자수로 결정 하였고, 댐플의 형상변화에 따라 격자수는 다소 달라질 수 있 으나 동일한 격자 밀도를 유지하여 격자계를 구성하였다. 최 적 격자의 벽면 근처에서는 유동 및 온도 구배의 정확한 예 측을 위해 프리즘(prism) 형태의 격자를 사용하였다. 아울러, 첫 번째 격자의 위치가  $y < 1.0$ 을 만족하도록 벽면으로부터  $0.0003H$  거리에 위치시켜 저레이놀즈수 SST 모델이 적용되도 록 하였으며, 이는 모든 댐플 형상에 동일하게 적용되었다.

수치해석의 수렴 기준으로 모든 변수의 잔차(Residual)가  $1.0e-6$  이하가 되도록 설정하였으며, 약 600번의 반복 계산을 수행하였다. 계산시간은 8-part local parallel mode 로 Intel i7 2.67 GHz CPU를 사용하여 약 4시간이 소요되었다.

### 3. 형상 변수 및 성능 함수

Table 1에 본 연구에서 시험한 여섯 가지 형상을 나타내었 다. Case 1~4는 타원의 지름비( $d_2/d_1$ )의 영향을 알아보기 위한 형상이다. 타원의 장축이 유동방향과  $60^\circ$ 를 이루도록 고정하

Table 1 Shape parameters of each inclined dimple case

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
$d_2/d_1$	1.00	0.85	0.70	0.55	0.70	0.70
$\alpha$	$60^\circ$	$60^\circ$	$60^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$

후 타원의 지름비를 1.00에서 0.55까지 변화시켰다. 타원의 장 축의 각도가 미치는 영향은 Case 3, 5 및 6을 통해 알아보았 다. 타원의 지름비를 0.70으로 고정한 후 타원의 장축의 각도 ( $\alpha$ )를  $60^\circ$ 와  $90^\circ$ 사이에서 변화시켰다.

본 연구에서는 기울어진 타원형 댐플 냉각 유로의 열전달 및 압력강하 성능을 평가하기 위한 성능함수를 정의하였다. 열전달 관련 성능함수는 면적평균 누셀트수( $Nu_a$ )를 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$Nu_a = \frac{\int_A Nu/Nu_0 dA}{A} \tag{1}$$

$$Nu = \frac{q_0 D_h}{k_f (T_w - T_b)}$$

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

여기서  $Nu_a$ 는 면적 평균한 누셀트수 비이며  $A$ 는 열전달이 발 생하는 면적을 나타낸다.  $Nu_0$ 는 완전 발달된 매끈한 유로의 누셀트수를 나타내는 Dittus-Boelter 관계식이다.

압력손실과 관계된 성능함수는 마찰계수의 비( $F_f$ )를 사용하 여 다음과 같이 정의된다.

$$F_f = (f/f_0)^{1/3} \tag{2}$$

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2 \rho U^2 S}$$

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2}$$

여기서  $f$ 는 마찰계수이고,  $f_0$ 는 완전 발달된 매끈한 관 유동 에서의 마찰계수이다.

열전달과 마찰계수를 동시에 비교하여 열전달촉진장치의 전반적인 열전달 성능을 비교하기 위하여 Chang 등[13]에 의 해 제안된 열성능(Thermal Performance)을 사용하였으며, 열성 능은 동일 마찰계수에서의 열전달 성능비로 다음과 같이 정 의된다.

$$TP = Nu_a / F_f \tag{3}$$

### 4. 결과 및 검토

댐플 냉각 유로의 형상에 따른 면적 평균 누셀트수( $Nu_a$ )와 마찰계수( $F_f$ ) 그리고 열성능( $TP$ )을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Results of numerical analysis

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
$Nu_a$	1.38	1.92	2.32	2.49	2.37	2.22
$F_f$	1.16	1.46	1.65	1.68	1.63	1.47
$TP$	1.18	1.31	1.41	1.49	1.46	1.51

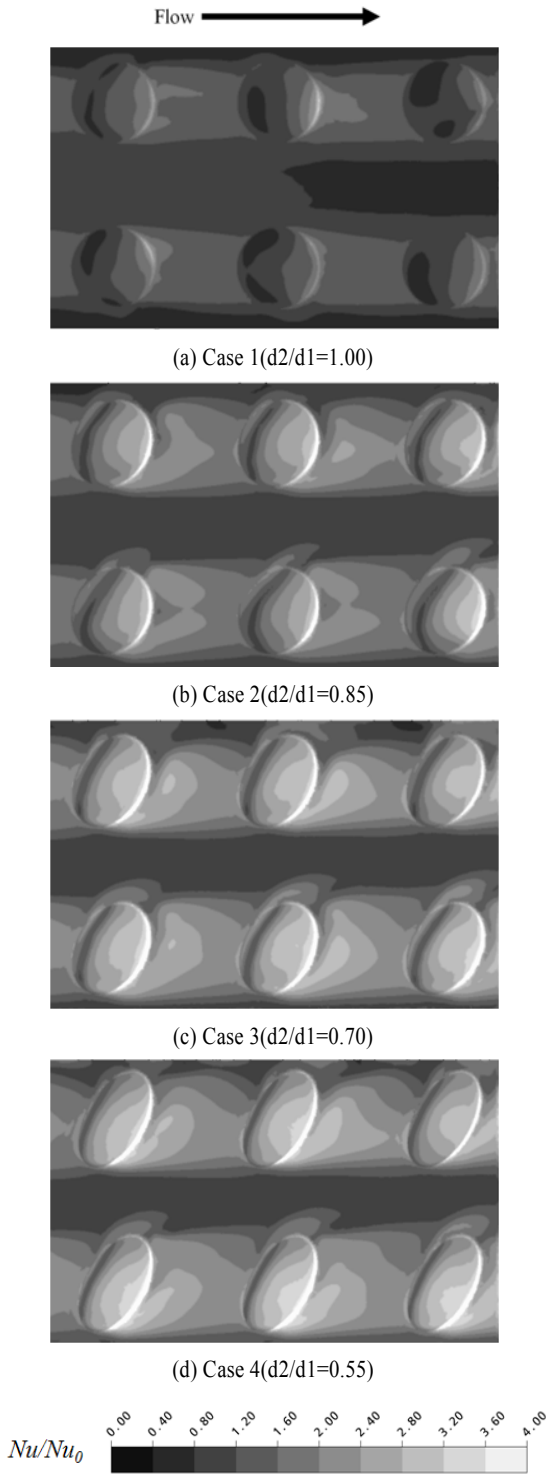
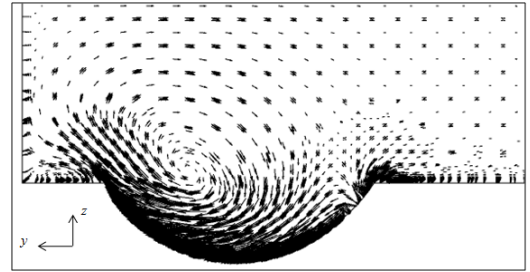
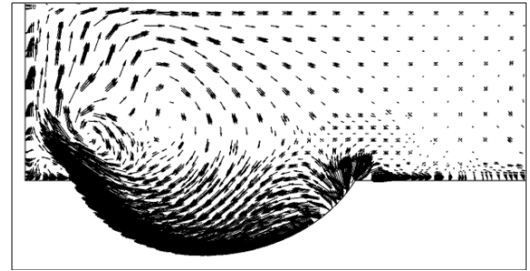


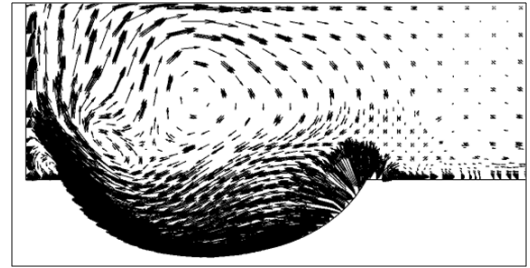
Fig. 4 Nusselt number contour at 5-7th lows of dimples for comparing the effect of  $d_2/d_1$



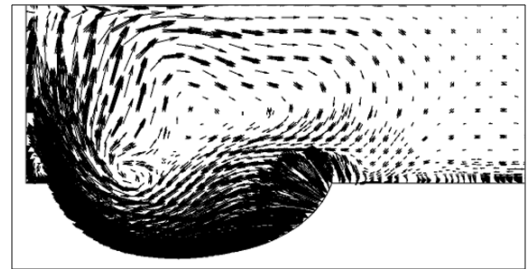
(a) Case 1( $d_2/d_1=1.00$ )



(b) Case 2( $d_2/d_1=0.85$ )



(c) Case 3( $d_2/d_1=0.70$ )



(d) Case 4( $d_2/d_1=0.55$ )

Fig. 5 Velocity vectors on spanwise plane at 6th dimple row

Case 4가 가장 높은 면적 평균 누셀트수를 나타내고 있으며, 가장 낮은 마찰계수는 Case 1에서 나타난다. 일반적인 원형 댐플인 Case 1에 비해 타원형 모양을 지니는 Case 2~6이 높은 열전달 및 마찰계수 그리고 열성능을 보여주고 있으며, 장축이 유동방향과 수직인 Case 6에서 가장 높은 열성능을 나타내고 있다. 60° 타원형 댐플인 Case 4는 가장 높은 면적 평

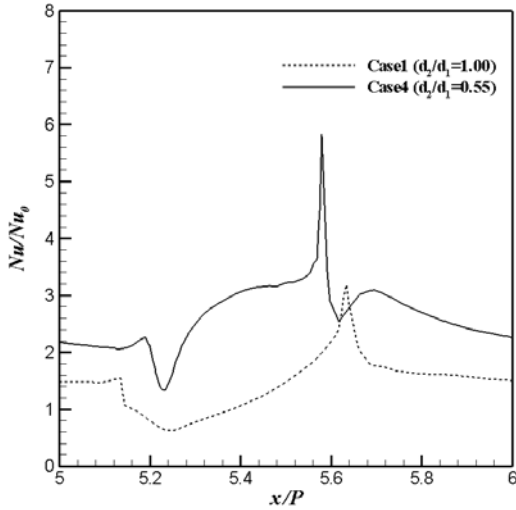


Fig. 6 Local Nusselt number distributions along a streamwise line ( $y/S=0.5$ ) through 6th dimple row

균 누셀트수를 보여준다. Case 4는 Case 1에 비해 누셀트수와 마찰계수가 각각 80%와 45% 증가하였으며, 열성능은 26% 증가하였다. Case 6은 Case 1에 비해 누셀트수, 마찰계수 그리고 열성능이 각각 61%, 27% 그리고 28% 증가하였다.

Fig. 4는  $d_2/d_1$  변화에 따른 누셀트수 분포를 나타낸 그림이다. 디플의 앞부분에서 형상에 상관없이 박리로 인해 열전달이 감소되는 부분이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 디플의 뒷부분에서 디플 면으로의 유동 재부착에 의해 높은 열전달이 발생한다. 냉각면의 중앙부, 즉 위아래 디플 사이에는 디플에 의한 유동교란효과가 영향을 미치지 않기 때문에 매끈한 관에서의 열전달과 유사한 낮은 누셀트수 분포를 보이고 있다. 디플의 지름비( $d_2/d_1$ )가 감소함에 따라 전체적으로 열전달이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 디플의 지름비가 감소함에 따라 디플의 후류에서 측면 방향으로 강한 와류를 유도하며 이는 열전달 상승을 촉진시킨다. 타원형 디플은 디플의 장축이 길어짐에 따라 냉각 유로에 디플이 영향을 주는 영역이 넓어지며 이로 인해 냉각유로 중앙부의 열전달 역시 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 제 6열의 디플을 지나는 유동에 수직인 평면에서의 속도벡터 분포를 보여주고 있다. 모든 디플 형상이 시계 방향의 와류를 형성하고 있다. 원형 디플 형상인 Case1은 유동을 특정한 방향으로 유도하지 않으므로 와류의 강도가 타원형 디플에 비해 약한 것을 확인할 수 있다. 기울어진 타원형 디플은 기온 각도에 따라 유동을 측면 방향으로 유도한다. 이로 인해 생기는 강한 와류에 의해 냉각유로 내부의 냉각유체가 골고루 섞이며, 디플 내부 및 후류의 열전달이 강화된

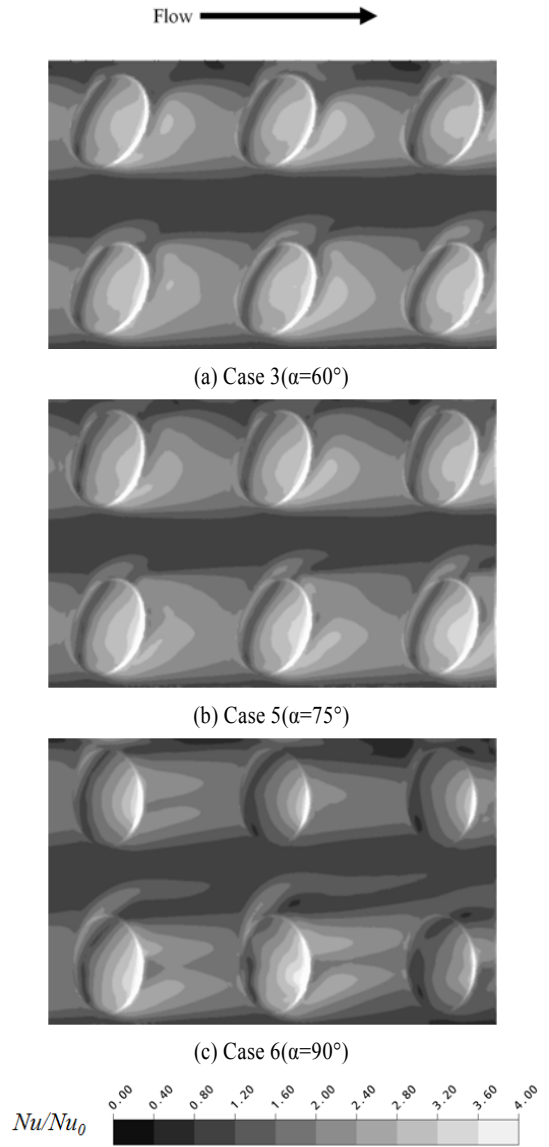


Fig. 7 Nusselt number contour at 5-7th rows of dimples for comparing the effect of  $\alpha$

다. 타원의 지름비가 감소함에 따라 와류의 크기 및 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 이로 인한 열전달 상승효과는 Table 2를 통해 확인할 수 있다.

유동방향 디플 중앙선( $y/S=0.5$ )을 따라 분포하는 누셀트수를 Fig. 6에 나타내었다. Case 1과 Case 4 모두 디플 앞부분에서 박리로 인해 열전달이 감소하며, 뒷부분에서 재부착에 의한 열전달 상승해 디플후단 경계에서 최고치가 발생한다. Case 4는 타원형 모양에 의해 단축이 Case 1에 비해 짧아, 제

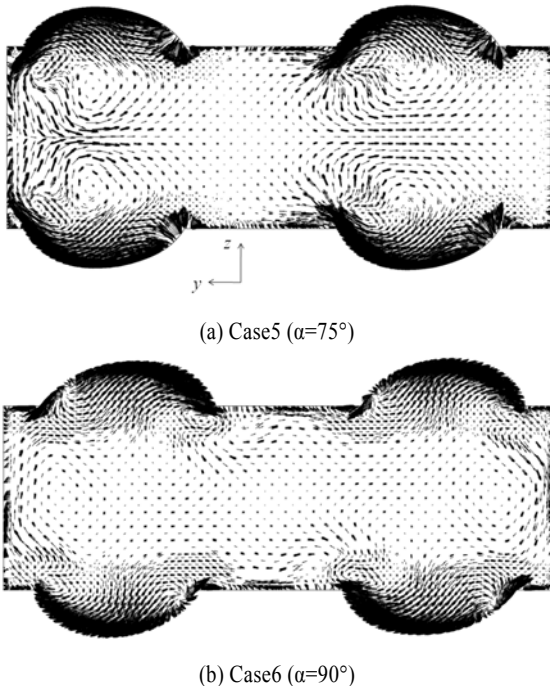


Fig. 8 Velocity vectors on spanwise plane at 6th dimple row

부착이 빠르게 일어나게 된다. 이로 인해 Case4의 최대 누셀트수는 Case 1에 비해 약 2배의 값을 보인다. 이는 디플 후류 및 재순환에 의한 디플 내부의 열전달 상승에 기여하게 된다.

Fig. 7은 타원형 디플의 장축 각도 변화에 따른 누셀트수 분포를 나타내고 있다. 디플 지름비( $d_s/d_f=0.70$ )가 동일한 경우, 타원형 디플의 장축이 유동 방향과 75° 각도를 가질 때 (Case 5), 가장 높은 열전달 계수를 지니고 있다. Case 3과 Case 5의 누셀트수 분포는 유사하나, Case 6과 큰 차이를 나타내고 있다. 장축이 90° 각도를 지니는 Case 6은 측면으로 유출된 유동이 다시 벽면으로 재부착되어 중앙부에 높은 열전달 영역을 형성한다. 장축이 유동 방향과 수직을 이루지 않은 Case 3과 5는 디플로부터 유출된 유동이 재부착되지 않고 와류를 형성하여 냉각유체의 혼합을 촉진하여 디플 후류에서의 열전달 상승을 유도한다.

Fig. 8은 디플 각도에 따른 유동에 수직되는 평면에서의 벡터 분포를 비교한 그림이다. Case 5의 경우 기울어진 디플 형상에 의해 측면 방향으로 유도된 유동이 4개의 큰 와류를 생성한 것을 볼 수 있다. 이로 인해 열전달이 크게 향상되지만 측면과 냉각 유체의 강한 상호 작용에 의해 마찰 손실 또한 크게 증가하게 됨을 Table 2를 통해 확인할 수 있다. Case 6의 경우에는 디플 내부의 박리로 인해 생기는 와류가 존재하나 그 영향이 유로의 중심까지 미치지 않으며, 유동이 디플

면으로 재부착된다. 이로 인해 기울어진 타원형 디플 형상에 비해 열전달 및 압력 강하가 낮게 나타난다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기울어진 타원형 디플이 부착된 냉각 유로에 대해 유동해석을 수행하였다. 타원의 지름비와 장축의 각도를 형상 변수로 설정하였으며, 서로 다른 형상변수를 가진 여섯 가지 형상들에 대해 열전달 관련 성능함수, 압력강하 관련 성능함수, 그리고 열성능을 비교하였다. 기본적인 원형 디플에 비해 타원형 디플이 부착된 유로가 높은 열전달 및 압력강하를 보여주었다. 타원의 지름비가 감소함에 따라 디플이 유도하는 와류 강도가 더욱 강해짐을 확인 할 수 있었으며 이로 인해 열전달이 강화되었다. 장축의 각도의 영향을 살펴보면 75°의 각도를 가질 때 가장 높은 열전달을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 기울어진 디플의 경우 냉각 유로 내에 네 개의 와류가 발생하여 벽면과 채널 중심의 냉각 유체의 혼합을 촉진하며, 이는 열전달 성능을 강화시키게 된다.

### 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD연구센터(ERC)’의 과제로 수행된 연구임(No.20090083510).

### 참고문헌

- [1] 2008, Hwang, S.D., Kwon, H.G. and Cho, H.H., "Heat transfer with dimple/protrusion arrays in a rectangular duct with a low Reynolds number range," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.29, pp.916-926.
- [2] 2002, Mahmood, G.I. and Ligrani, P.M., "Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45, pp.2011-2020.
- [3] 2001, Ligrani, P.M., Mahmood, G.I., Harrison, J.L., Clayton, C.M. and Nelson, D.L., "Flow structure and local Nusselt number variations in a channel with dimples and protrusion on opposite walls," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.44, pp.4413-4425.
- [4] 2008, Elyyan, M.A., Rozati, A. and Tafti, D.K., "Investigation of dimpled fins for heat transfer enhancement

- in compact heat exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.51, pp.2950-2966.
- [5] 2003, Isaev, S.A. and Leont'ev, A.I., "Numerical simulation of vortex enhancement of heat transfer under conditions of turbulent flow past a spherical dimple on the wall of a narrow channel," *High Temperature*, Vol.44, pp.665-679.
- [6] 2008, Samad, A., Lee, K.D. and Kim, K.Y., "Multi-objective optimization of a dimpled channel for heat transfer augmentation," *Heat Mass Transfer*, Vol.45, pp.207-217.
- [7] 2002, Moon, S.W. and Lau, S.C., "Turbulent heat transfer measurements on a wall with concave and cylindrical dimples in a square channel," *ASME Turbo Expo 2002*, GT2002-30208.
- [8] 2005, Park, J. and Ligrani, P.M., "Numerical predictions of heat transfer and fluid flow characteristics for seven different dimpled surfaces in a channel," *Numerical Heat Transfer-Part A*, Vol.47, pp.209-232.
- [9] 2009, Silva, C., Park, D., Marotta, E.E. and Fletcher, L.S., "Optimization of fin performance in a laminar channel flow through dimpled surfaces," *Journal of Heat Transfer*, Vol.131, No.2, 021702-1-021702-9.
- [10] 2002, Vicente, P.G., Garcia, A. and Viedma, A., "Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45, pp.543-553.
- [11] 2006, ANSYS CFX-11.0 Solver Theory, Ansys Inc.
- [12] 1994, Menter, F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA-Journal*, Vol.32, No.8, pp.1598-1605.
- [13] 2008, Chang, S.W., Yang T.W., Huang, C.C. and Ching, K.F., "Endwall heat transfer and pressure drop in rectangular channels with attached and detached circular pin-fin array," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.51, pp.5247-5259.