

새로운 수동제어소자인 공동을 이용한 마찰력과 열전달 감소에 관한 연구

한성현*·최해천**

Cavity as a New Passive Device for Reduction of Skin Friction and Heat Transfer

Seonghyeon Hahn* and Haechon Choi**

Key words : Cavity(공동), Drag Reduction(항력감소), Heat Transfer(열전달), Friction Drag(마찰항력), Pressure Drag(압력항력), Flow Oscillation(유동 진동), Recirculating Vortex(재순환 보텍스), Streamwise Vortex(유동방향 보텍스)

Abstract

In order to examine the possibility of using a cavity as a passive device for reduction of skin friction and heat transfer, an intensive parametric study over a broad range of the cavity depth and length at different Reynolds numbers is performed for both laminar and turbulent boundary layers in the present study. Direct and large eddy simulation techniques are used for turbulent boundary layers at low and moderate Reynolds numbers, respectively. For both laminar and turbulent boundary layers over a cavity, a flow oscillation occurs due to the shear layer instability when the cavity depth and length are sufficiently large and it plays an important role in the determination of drag and heat-transfer increase or decrease. For a cavity sufficiently small to suppress the flow oscillation, both the total drag and heat transfer are reduced. Therefore, the applicability of a cavity as a passive device for reduction of drag and heat transfer is fully confirmed in the present study. Scaling based on the wall shear rate of the incoming boundary layer is also proposed and it is found to be valid in steady flow over a cavity.

1. 서 론

공동은 여러 가지 운송체나 구조물의 표면에서 흔하게 접할 수 있는 형상이다. 대부분의 경우 공동은 그 크기가 외부 경계층 유동의 경계층 두께에 비하여 대단히 크며, 이 경우 공동은 유동 진동을 발생시키고 항력과 유동 소음을 크게 증가시키며 잘 알려져 있다. 그러나 최근에 공동의 크기가 외부 경계층 유동의 경계층 두께에 비하여 대단히 작을 경우 공동 위에서 항력이 감소할 수 있다는 실험 결과가 보고됨으로써 항력 감소를 위한 수동제어소자로서 공동의 응용 가능성이 제기되기 시작하고 있다.^[1,2]

공동의 크기가 그 위를 지나는 경계층 유동의 경계층 두께에 비하여 대단히 작을 경우에 공동은 벽면 거칠기의 범주에서 다루어져 왔으며, 이에 대한 연구는 주로 실험적인 방법으로 이루어져 왔다. 초기에는 주로 난류 경계층의 자기보존(self-preservation) 성립 여부에 초점을 맞추어 연구가 진행되어져 오다가^[3,4] 최근에 Tani 등^[1], Choi와 Fujisawa^[2]에 의하여 공동 주위 항력 감소의 가능성이 검토되었다. 그러나 지금까지의 실험적 연구에서는 벽마찰의 측정에 있어서 어느 정도의 근사 및 가정이 불가피하였으며, 지금까지 보고된 공동 주위 항력 감소량은 그다지 크지 않기 때문에 그 정확성에 한계가 있다. 이에, 본 연구에서는 정밀한 수치해석을 통해 공동 위 경계층 유동에서 항력 감소의 가능성을 타진하고자 하며, 항

력과 열전달 사이의 상사성에 주목하여 공동 주위 열전달 감소의 가능성을 검토하고자 열전달 해석을 병행하였다.

2. 수치해석 방법 및 계산 조건

본 연구에서는 자유유동 속도(u_∞)와 공동 후향 모서리의 위치에서 측정된 평판 경계층 유동의 운동량 두께(θ_b)를 기준으로 한 레이놀즈 수(Re)가 340과 1520인 두 가지 난류 경계층 유동에 대해 비정상 삼차원 수치해석을 수행하였다. 유체는 공기로서 프란틀 수는 $Pr=0.71$ 이다. $Re=340$ 의 경우 직접 수치모사 기법을 이용하였으며, $Re=1520$ 의 경우 큰 에디 수치모사 기법을 이용하였다. 한편, $Re=340$ 의 경우 공동의 깊이(d)와 길이(l)가 $(d/\theta_b, l/d)=(0.45, 1), (0.45, 2), (0.45, 4), (0.9, 1), (0.9, 2), (0.9, 4)$ 인 6가지 공동 크기 및 형상에 대해 계산을 수행하였으며, $Re=1520$ 의 경우 $(d/\theta_b, l/d)=(1.46, 1), (1.46, 2), (1.46, 4), (3.44, 1), (3.44, 2), (0.93, 4)$ 의 6가지 경우에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 1에 삼차원 계산영역의 도식을 나타내었다. 입구 경계조건으로는 별도의 난류 경계층 수치모사로부터 얻어진 속도장 및 온도장을 매 시간단계마다 계산 영역의 입구에 부과하였으며, 출구 경계조건으로는 대류출구경계조건, 벽면에서는 점착조건과 등온조건, 원거리에서는 $u = u_\infty$, $\partial v/\partial y = \partial w/\partial y = 0$, $T = T_\infty$ 의 경계조건이 부과되었다. 이와 더불어 $Re=75$ 와 300의 두 레이놀즈 수에 대하여 공동 위 층류 경계층 유동의 이차원 수치해석을 수행하였으며, 각각의 레이놀즈 수에 대하여 공동의 깊이와 길이를 각각 $d/\theta_b=0.5$,

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 난류제어연구단, hsh95@prandtl.snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부, choi@socrates.snu.ac.kr

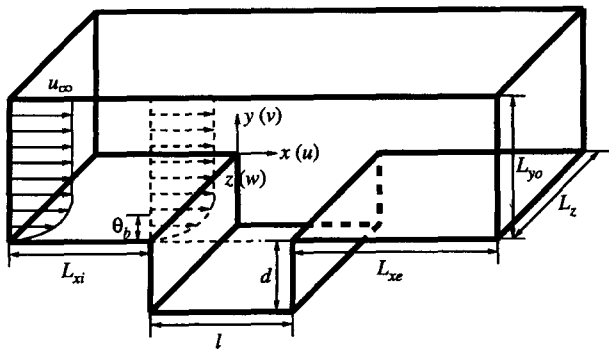


Fig. 1. Schematic diagram of the three-dimensional computational domain.

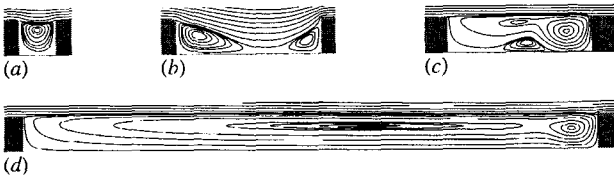


Fig. 2. Streamlines inside a cavity at $Re=75$: (a) $(d/\theta_b, l/d) = (0.5, 1)$; (b) $(d/\theta_b, l/d) = (0.5, 4)$; (c) $(d/\theta_b, l/d) = (16, 4)$; (d) $(d/\theta_b, l/d) = (8, 16)$. Flow direction is from left to right.

1, 2, 4, 8, 16과 $l/d=1, 2, 4, 8, 16$ 으로 변화시켜가며 모두 30가지 공동 크기 및 형상에 대해 계산을 수행하였다. 공동 위 층류 경계층 유동의 이차원 수치해석에 사용된 벽면 및 원거리 경계 조건은 난류 유동 삼차원 수치해석의 경우와 동일하며, 입구에서는 Blasius 속도 및 온도 분포, 출구 경계조건은 정상 유동일 경우 $\partial^3(\cdot)/\partial x^3 = 0$, 유동 진동이 발생하는 비정상 유동일 경우 대류출구경계조건이 부과되었다. 각각의 경우에 대한 계산 영역의 크기, 격자수 등 수치해석의 상세사항은 한성현⁵⁾을 참조하기 바란다.

3. 결과 및 토의

3.1 공동 위 층류 경계층 유동

$Re=75$ 와 300에 대해 각각 30가지 서로 다른 공동 주위 유동을 이차원 수치해석한 결과 $Re=75$ 의 경우 $(d/\theta_b, l/d) = (16, 8), (16, 16)$, $Re=300$ 의 경우 $(d/\theta_b, l/d) = (8, 8), (8, 16), (16, 4), (16, 8), (16, 16)$ 의 총 7가지 경우에 대해서 전단층 불안정성에 의한 유동 진동이 발생하였으며, 이 경우 모두 공동이 없는 평판 경계층에 비해 항력 및 열전달이 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서, 이 절에서는 공동 위 층류 경계층 유동이 정상상태로 유지되는 경우에 대한 결과를 위주로 토의를 진행하기로 한다.

Fig. 2는 $Re=75$ 의 경우 몇 가지 공동 크기 및 형상에 대한 공동 내부의 유선을 보여 준다. 공동의 형상비(l/d)가 그다지 크지 않을 경우(Fig. 2a), 공동 상류 경계층 유동은 공동의 후향 모서리에서 박리된 후 공동의 전향 모서리에 재부착하며 공동 내부에는 재순환 보텍스가 형성됨을 볼 수 있다. 이 재순환 보텍스는 공동 바닥 가까이에서 주유동과는 반대 방향의 유동을 형성시키므로 공동 바닥에서 마찰력의 감소를 가져온

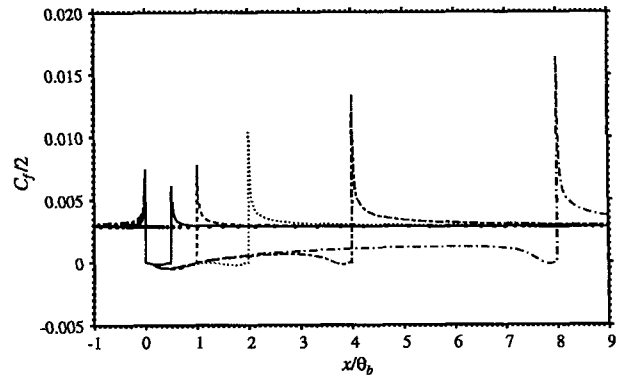


Fig. 3. Skin-friction coefficient at $Re=75$ and $d = 0.5\theta_b$: —, l/d ; ---, $l=2d$; ·····, $l=4d$; - · - ·, $l=8d$; - - - -, $l=16d$; •, flat plate.

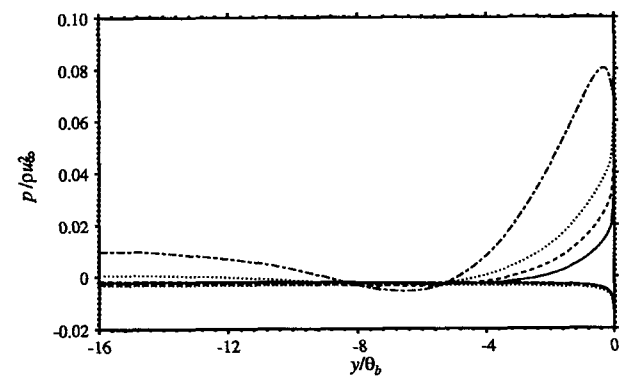


Fig. 4. Distribution of pressures at the two cavity walls for $Re=75$ and $d = 16\theta_b$: —, l/d ; ---, $l=2d$; ·····, $l=4d$; - · - ·, $l=8d$. Upper and lower curves are for the forward- and backward-facing walls, respectively.

다. 그러나 공동의 크기가 매우 작은 $d = 0.5\theta_b$ 의 경우에는 공동의 형상비가 $l/d=4$ 로서 비교적 작을 때 이미 후향 모서리에서 박리된 유동이 공동 바닥에 재부착된다(Fig. 2b). 그러나 공동의 크기가 $d = 8\theta_b$ 정도로 충분히 커지게 되면(Fig. 2d), $l=16d$ 와 같이 길이가 긴 공동에서도 공동 바닥에의 재부착은 발생하지 않으며 공동 내부의 재순환 보텍스는 전향 벽면 근처의 강도가 강한 주 보텍스와 나머지 공동 전체 영역에 걸치는 약한 재순환 보텍스의 둘로 분할된다. 공동의 깊이가 $d = 16\theta_b$ 로 더욱 커지게 되면(Fig. 2c) 공동 내부의 유동 형태는 보다 더 복잡한 양상을 보이는데, 공동 전향 벽면 근처의 주 보텍스와 더불어 공동 바닥 근처에서의 점착 조건으로 인한 이차 보텍스가 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 3은 $Re=75$, $d = 0.5\theta_b$ 의 경우 공동 주위에서의 마찰계수 분포를 보여준다. 이 그림에서 마찰계수가 급격히 변화하는 두 위치는 각각 공동의 후향 벽면($x=0$)과 전향 벽면($x=l$)에 해당한다. 공동의 상류에서 마찰계수가 다소간 증가함을 볼 수 있으며 Fig. 2에서 언급한 바와 같이 공동 바닥에서 음의 마찰계수를 갖게 되고 이로 인해 공동 바닥에서 마찰력이 크게 감소함을 알 수 있다. Fig. 3의 그래프 중 $l/d = 4, 8, 16$ 의 경우는 공동의 후향 모서리에서 박리된 유동이 공동 바닥에 재부착되는 경우인데, 이 경우에도 재부착점 이후의 공동 바닥에서의 마찰계수는 그다지 크게 증가하지 않으며 따라서

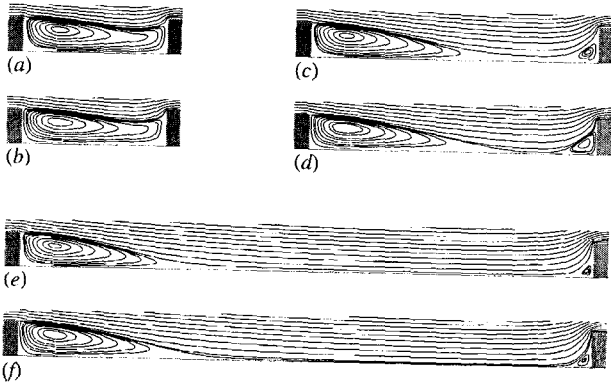


Fig. 5. Streamlines inside a cavity: (a) $(d/\theta_b, l/d) = (1, 4)$ at $Re=75$; (b) $(d/\theta_b, l/d) = (0.5, 4)$ at $Re=300$; (c) $(d/\theta_b, l/d) = (1, 8)$ at $Re=75$; (d) $(d/\theta_b, l/d) = (0.5, 8)$ at $Re=300$; (e) $(d/\theta_b, l/d) = (1, 16)$ at $Re=75$; (f) $(d/\theta_b, l/d) = (0.5, 16)$ at $Re=300$.

마찰항력은 재부착 여부와 관계 없이 공동 바닥 전체에서 크게 감소하게 된다. 그러나, 공동 바로 뒤 하류에서는 공동 위를 지나는 전단층의 부착으로 인하여 마찰계수가 크게 증가하며, 이는 하류로 가면서 감소하여 점차 평판 경계층 유동의 마찰계수 값을 회복한다.

Fig. 4는 $Re=75$, $d=16\theta_b$ 의 경우 공동의 두 벽면에서의 압력 분포를 보여 준다. 고정된 공동 깊이에서 공동의 길이가 증가함에 따라 공동의 전향 벽면에서의 압력은 크게 증가하고, 공동 후향 벽면에서의 압력은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 공동 주위 유동에서는 마찰항력과 더불어 공동의 양 벽면간 압력차에 기인하는 압력항력이 존재하며, 따라서 압력항력은 고정된 공동 깊이에서 공동의 길이가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 한편, 공동 주위 유동이 정상상태로 유지될 경우 공동의 전향 벽면에서 압력의 최대값은 항상 공동의 전향 모서리에서 발생하지만, 전단층 불안정성에 의한 유동 진동이 발생할 경우에는($l=8d$) 공동의 전향 벽면에서 압력의 최대값이 발생하는 위치가 아래로 이동하게 된다. 이는 공동 내부 재순환 보텍스와 공동 위를 지나는 전단층 사이의 활발한 비정상 상호작용에 기인하며 이 최대값 주위에서 전향 벽면의 압력이 크게 증가하게 되어 유동 진동이 발생될 경우에는 압력항력이 크게 증가한다.

공동 주위 항력에는 압력항력과 마찰항력의 두 가지 요소가 존재하며, 이 두 요소는 공동의 깊이 및 길이의 변화에 따라 서로 상반되는 경향을 보이므로 총항력의 증감을 논하기 위해서는 이들 두 요소를 복합적으로 고려하여야 한다. 항력 감소율(performance of drag reduction; PDR)은 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$PDR(\%) = \frac{\int_{x_{ref1}}^{x_{ref2}} [\tau'_{cav}(x) - \tau_{flat}(x)] dx}{\int_{x_{ref1}}^{x_{ref2}} \tau_{flat}(x) dx} \times 100. \quad (1)$$

여기서 τ'_{cav} 는 아래와 같이 압력항력(D_p)을 평균적으로 공동 내부에 더해 주어 공동 주위에서의 총항력을 $\int \tau'_{cav}(x) dx$ 와 같이 계산할 수 있도록 정의된 전단응력이다:

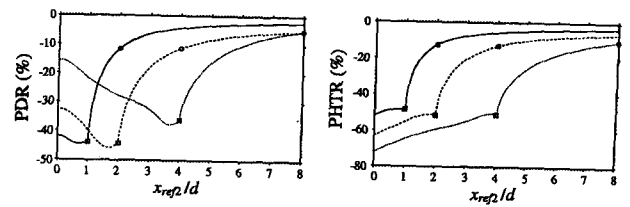


Fig. 6. Performance of drag reduction (left) and heat-transfer reduction (right) at $Re=340$ and $d = 0.9\theta_b$: —, $l=d$; - - -, $l=2d$; ·····, $l=4d$. □ and ○ denote the locations of $x_{ref2} = l$ and $x_{ref2} = 2l$, respectively.

$$\tau'_{cav}(x) = \begin{cases} \tau_{cav}(x) + D_p / l & (0 < x < l) \\ \tau_{cav}(x) & (\text{elsewhere}) \end{cases} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 τ_{flat} 은 평판 경계층에서의 벽전단응력이며, τ_{cav} 는 Fig. 3에서 제시된 바와 같은 공동 주위에서의 벽전단응력이다. 따라서 식 (1)의 분자는 공동 위에서와 평판 경계층에서의 항력 차이를, 분모는 기준값으로서 평판 경계층에서의 마찰항력을 의미한다. 그리고 x_{ref1} 과 x_{ref2} 는 각각 항력 감소율 계산을 위한 공동 상류와 하류의 기준 위치로서, 이상적으로는 공동 상류에서의 마찰계수가 평판 경계층의 마찰계수와 달라지기 시작하는 위치를 x_{ref1} 으로, 공동 하류에서 증가된 마찰계수가 거의 평판에서의 마찰계수를 회복한 위치를 x_{ref2} 로 선택해야 하지만, 대개의 경우 공동 상류에서의 마찰계수의 증가는 무시할 만하므로 본 연구에서는 $x_{ref1} = 0$ 으로 고정하였다. 한편, (1)에서 $x_{ref2} = 2l$ 로 계산한 항력 감소율은 일련의 공동이 공동의 길이와 같은 간격으로 배치되어 있는 경우의 항력감소율의 근사값으로 해석할 수 있다. 이 값은 공동 위 유동이 정상상태로 유지되는 경우 대략 -10%였으며, 따라서 층류 경계층 유동에서 항력 감소를 위한 수동제어소자로서 공동의 응용 가능성을 확인할 수 있었다. 열전달의 경우에도 항력의 경우와 유사하게 평판 경계층과 비교하여 공동 바닥에서는 열유속이 감소하였으며, 공동 하류에서는 열유속이 증가하였다. 또한 공동 주위 유동의 경우 공동 양 벽면으로부터의 열전달이 부가적으로 존재하므로 이들을 모두 고려하여 총열전달의 증감을 파악하여야 한다. 식 (1)과 유사한 방법으로 공동 위에서의 열전달 감소율을 계산한 결과 공동 위 유동이 정상상태를 유지할 경우에 총 열전달 또한 감소하였으며 그 값 또한 대략 -10% 정도로 항력 감소율과 유사하였다.

한편, 공동 위 유동이 정상상태를 유지할 경우, 공동 내부 유동은 자유유동 속도보다는 공동 위를 지나는 경계층 유동의 벽전단변형률과 밀접한 관계가 있음을 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공동 위 경계층 유동의 기준 전단변형률과 공동의 깊이를 기준으로 한 새로운 레이놀즈 수 $Re_S = (\partial u / \partial y |_{ref}) d^2 / \nu$ 와 같이 정의하였다. $\partial u / \partial y |_{ref}$ 는 기준 전단변형률로서 본 연구에서는 공동 후향 모서리의 위치에서 측정된 평판 경계층의 벽전단변형률로 정의하였다. Fig. 5는 몇 가지 경우의 공동 주위 정상 유동에 대하여 공동 내부의 유선을 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a)와 (b), (c)와 (d), (e)와 (f)는 각각 외부 경계층 유동의 레이놀즈 수와 공동 깊이는 서로 다르지

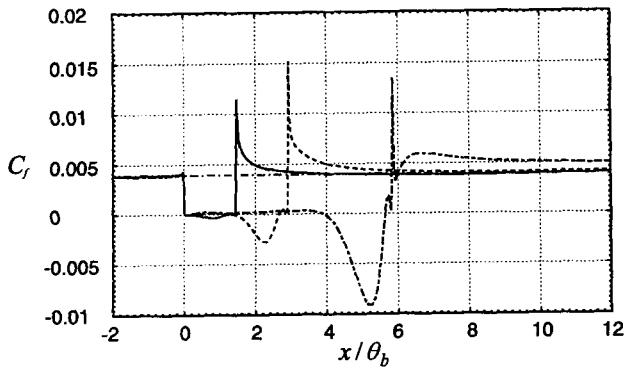


Fig. 7. Skin-friction coefficient at $Re=1520$ and $d=1.46\theta_b$: —, $l=d$; ----, $l=2d$; - · - · -, $l=4d$; ·····, flat plate.

만 같은 Re_3 와 형상비(l/d)를 갖는 경우이다. Fig. 5로부터 개개의 유동 조건은 다르지만 같은 Re_3 를 갖는 경우 공동 내부의 유동 형태가 거의 완벽하게 일치함을 볼 수 있다. 이와 같이 전단변형률에 기준한 스케일링의 개념을 발전시키면 공동 주위 층류 경계층 유동에서 항력 감소를 얻을 수 있는 적절한 공동 크기의 기준을 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 공동 위 난류 경계층 유동

공동 위 난류 경계층 유동에서도 공동의 깊이 및 길이의 변화에 따라 유사한 압력항력 및 마찰항력의 변화를 관찰할 수 있었다. Fig. 6은 $Re=340$, $d=0.9\theta_b$ 의 경우에 대하여 식 (1)과 같이 계산된 항력 감소율과 열전달 감소율(performance of heat-transfer reduction; PHTR)을 x_{ref2} 의 함수로 나타낸 것이다. $x_{ref2}=1$ 에서의 항력 감소율은 대략 -40%, 열전달 감소율은 대략 -50% 정도의 큰 값을 갖는데, 이는 공동의 양 벽면으로부터의 압력항력 및 열전달보다는 공동 바닥에서의 마찰 및 열전달 감소가 보다 지배적이고, 따라서 공동 하류에서의 마찰 및 열전달 증가를 고려하지 않을 경우, 공동에서의 항력 및 열전달은 평판 경계층에 비해 크게 감소함을 의미한다. 반면 x_{ref2} 가 증가함에 따라 항력 및 열전달 감소율은 빠르게 증가하여 0에 수렴하는데, 이는 공동 하류에서의 마찰 계수 및 열유속의 증가와 기준 적분 구간의 증가에 따른 기준 항력의 증가때문이다. 그럼에도 불구하고 공동 하류에서의 항력 및 열전달 감소율은 $x_{ref2} > 1$ 에서도 여전히 음의 값을 가지며, 이는 공동 하류에서의 마찰계수 및 열유속의 증가를 고려하더라도 총항력 및 총열전달은 감소함을 의미한다. $Re=340$ 의 경우 공동의 깊이 $d=0.9\theta_b$ 는 벽단위로 대략 16 정도로서 대단히 작으며, 따라서 전단층 불안정성에 의한 유동 진동을 발생시키지 않아 총항력 및 총열전달은 감소한다.

Fig. 7은 $Re=1520$, $d=1.46\theta_b$ 의 경우의 공동 주위 마찰계수의 분포를 보여 준다. 이 때, $l=d$, $l=2d$ 의 경우는 항력이 감소하는 경우이며, $l=4d$ 의 경우는 전단층 불안정성의 발생으로 인해 총항력이 증가하는 경우인데, 후자의 경우 공동 하류에서의 마찰계수는 공동 바로 뒤에서 급격히 감소했다가 다시 증가하여 극대값을 갖고 서서히 감소함을 볼 수 있다. 이로 인해 공동으로부터 먼 하류에서도 평판 경계층의 마찰계수 값을 회복하지 못하며 공동 하류에서의 마찰력이 크게 증가함을 알



Fig. 8. Iso-surfaces of the streamwise vorticity in case of $(d/\theta_b, l/d)=(1.46, 4)$ at $Re=1520$.

수 있다. 이와 유사한 현상은 $Re=300$, $(d/\theta_b, l/d)=(16, 4)$ 인 경우의 공동 위 층류 경계층의 이차원 수치해석에서도 발견되었다.

Fig. 8은 $Re=1520$, $(d/\theta_b, l/d)=(1.46, 4)$ 의 경우에 대하여 주유동 방향 와도의 등와도면을 나타낸 것이다. 이 경우, 전단층 불안정성의 발생으로 인해 공동의 중앙부 이후에서 강한 주유동 방향 보텍스가 생성되어 공동의 하류로 떠내려감을 볼 수 있다. 이렇게 생성된 주유동 방향 보텍스는 공동의 하류에서 부가적으로 마찰력의 증가를 가져오는 것으로 생각된다.

4. 결론

작은 크기의 공동 주위에서 항력 및 열전달 감소의 가능성을 타진하고자, 다른 레이놀즈 수에 대하여 공동 위 난류 경계층 유동을 직접 수치모사 및 큰 에디 수치모사 기법을 이용하여 수치해석하였다. 이에 앞서 공동 위 층류 경계층 유동을 이차원 수치해석한 결과, 전단층 불안정성에 의한 유동 진동을 발생시키지 않을 정도로 공동의 크기가 충분히 작을 경우, 공동 주위 항력 및 열전달이 평판 경계층에 비해 감소하였다. 난류 경계층에서도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 따라서 항력 및 열전달 감소를 위한 수동제어소자로서 공동의 응용가능성을 확인하였다. 리블렛과 달리 공동은 층류 경계층에서도 항력을 감소시키며, 따라서 보다 더 넓은 응용 범위를 가질 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] I. Tani, H. Munakata, A. Matsumoto & K. Abe, Turbulence management by groove roughness, In *Turbulence management and relaminarisation* (Eds. H. W. Liepman & R. Narasimha), Berlin, Springer-Verlag (1987).
- [2] K.-S. Choi & N. Fujisawa, Possibility of drag reduction using d-type roughness, *Appl. Sci. Res.*, 50 (1993), 315.
- [3] A. E. Perry, W. H. Schofield & P. N. Joubert, Rough wall turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 177 (1969), 383.
- [4] L. Djenidi, R. Elavarasan & R. A. Antonia, The turbulent boundary layer over transverse square cavities, *J. Fluid Mech.*, 395 (1999), 271.
- [5] 한성현, 새로운 수동제어소자인 공동을 이용한 마찰력과 열전달 감소에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교 기계항공공학부 (2002).