

횡 방향 공동을 이용한 마찰 저항 감소

김철규* · 전우평** · 최해천***

Reduction of the Skin Friction Drag Using Transverse Cavities

Chulkyu Kim*, Woo-Pyung Jeon** and Haecheon Choi***

Keywords : Skin friction drag reduction (표면 마찰 저항 감소), Passive device (수동 소자), Cavity (공동)

Abstract

In this study, we experimentally investigate the possibility of skin-friction drag reduction by series of transverse cavities in a turbulent boundary layer flow. The effects of cavity depth (d), cavity length (l) and cavity spacing (s) on the skin friction drag are examined in the range of $Re_\theta = 4030 \sim 7360$, $d/\theta_0 = 0.13 \sim 1.03$, $l/d = 1 \sim 4$ and $s/d = 5 \sim 20$. We perform experiments for twenty different cavity geometries and directly measure total drag force using in-house force measurement system. In most cases, the skin friction drag is increased. At several cases, however, small drag reduction is obtained. The variation of the skin friction drag is more sensitive to the cavity length than to the cavity depth or cavity spacing, and drag is reduced at $s/l \geq 10$ and $l/\theta_0 \leq 0.26$ irrespective of the cavity depth. At $l/\theta_0 = 0.13$ and $s/l = 10$, maximum 2 % drag reduction is achieved. When the skin friction drag is reduced, there is little interaction between the flows inside and outside cavity, and the flow changed by the cavity is rapidly recovered at the following crest. A stable vortex is formed inside a cavity in the case of drag reduction. This vortex generates negative skin friction drag at the cavity bottom wall. Although there is form drag due to the cavity itself, total drag is reduced due to the negative skin friction drag.

1. 서론

거친 표면에서의 마찰 저항이 매끈한 표면에 비해 증가할 것이라는 우리의 통상적인 직관과는 반대로, d-type 표면 거칠기 또는 작은 공동에 의해 마찰 저항이 감소할 가능성이 있다는 몇몇 연구결과가 보고 되었다.^{[1][6]} 이는 공동이 마찰 저항을 줄일 수 있는 수동 소자로 이용될 수 있는 가능성을 제시한다는 점에서 흥미로운 내용이다. 그러나 마찰 저항을 정확히 실험적으로 측정하는 것은 매우 힘든 일이기 때문에, 이들 공동에 의한 마찰 저항 변화에 대한 연구에서 대부분의 연구자들은 간접적인 방법들을 이용하여 저항의 변화를 추정하였거나, 측정하기 힘든 공동 바닥 면에서의 역방향 마찰 저항 또는 공동으로 인한 압력 저항을 무시하였다. 예를 들면, Choi and Fujisawa [2]는 압력 저항을 무시하고 Clauser chart를 이용하여 마찰 저항을 측정하였으며, Matsumoto [3]는 운동량 적분을 이용하여 항력 변화를 측정하였다. Elavarasan et al. [4]과 Wahidi et al. [5]는 역방향 마찰 저항과 압력 저항 둘 다 무시하였다. 더욱이 이러한 방법들에 기초해서 얻어진 마찰 저항의 변화량은 매우 작아서, 직접 힘의 측정을 통하여 정확한 항력 변화를 측정하여 항력 감소의 가능성을 검증해 볼 필요가 있다.

최근 Hahn [6]은 수치 해석 연구를 통해, 층류 그리고 난류 경계층 내에서 하나의 공동으로 인한 마찰 항력 감소의 가능성을 보였다. 그의 연구에서, 공동 위에서 전단층 불안정성의 생성을 막을 수 있을 정도로 공동의 크기가 충분히 작다면 항

력 감소를 기대할 수 있다고 하였다. 그러나, 공간적으로 변하는 경계층 유동의 특성 때문에 정확한 항력 감소량을 계산하는데 어려움이 있었다. 하지만 다중 공동의 경우에는 이러한 어려움이 없어지며, 더욱이 실제 응용 측면에서 본다면 다중 공동의 경우가 하나의 공동을 사용한 경우보다 더 실제적이다.

따라서 본 연구에서는 난류 경계층 내에서 다중 공동에 의한 항력의 감소 가능성에 대해, 실험적으로 알아보려고 하였다. 공동의 깊이, 길이, 공동간의 간격이 항력의 변화에 미치는 영향을 조사하고자 다양한 조합의 다중 공동에 대하여 연구를 수행하였으며, 연구 수행 범위 내에서 최적의 조합을 찾으려고 하였다. 또한 다중 공동에 의해 항력이 증가 또는 감소 하는 메커니즘을 유동가시화와 유동 방향 속도 측정으로 알아보려고 하였다.

2. 실험 장치

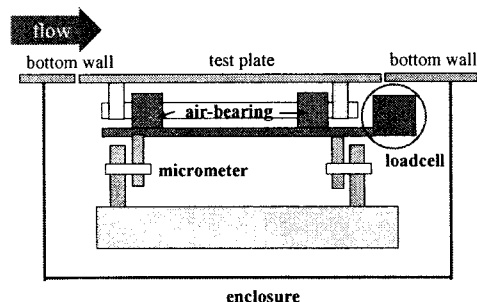


Fig. 1 Schematic of direct force measurement system.

* 서울대학교 대학원, kck2000@chol.com

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, wpjeon@snu.ac.kr

*** 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

현재의 실험은 개방형 흡입식 풍동에서 수행되었다. 풍동은 3 m/s에서부터 최대 35 m/s까지 안정된 성능을 보이며, 20 m/s에서 자유 유동의 평균 속도의 균일성과 난류 강도는 각각 0.5%였다. 시험부의 길이는 2 m이며, 영압력 구배를 얻기 위해 풍동 옆 벽을 하류 방향을 점점 넓혀서, 입구 부분의 단면적은 0.4 m×0.3 m이고 출구 부분의 단면적은 0.42 m×0.3 m이다. 시험부의 입구로부터 1.2 m 지점의 바닥 면에 크기 0.6 m×0.3 m의 사각형 시험판과 직접 힘 측정 장치를 설치하였다. 시험판은 평판, 리블렛 판, 다중 공동 판 들을 목적에 맞게 교체하여 실험을 수행하였다.

공동으로 인한 표면 마찰 저항의 변화는 Fig. 1과 같이 floating element와 로드셀을 이용하여 직접 측정하였다. 시험판은 4개의 에어 베어링을 이용하여 지지하였다. 로드셀은 최대 120 gf까지 측정이 가능하고 최대 오차는 정격 출력의 0.015 %이다. 로드셀에서 나오는 신호는 스트레인 앰프를 통하여 3000배 증폭시켰으며, 이를 A/D 변환기 (DT 2838)를 통하여 디지털 신호로 변환하였다. 시험판과 주변 물체와의 접촉을 방지하기 위해서 시험판과 주변 벽 사이에 약간의 틈이 존재하는데, 틈새의 크기는 시험판의 선단에서는 최대 0.2 mm이며 후단에서는 최대 1.5 mm이다. 시험판의 주변에 존재하는 틈새로 유동이 흡입 또는 분사가 될 수 있는데, 이는 힘을 측정하는데 매우 큰 오차 요인이 된다 [7]. 따라서 이를 막기 위해서 힘 측정 장치 주변을 완전히 밀폐하였다.

마찰 저항이 시험판의 배열이나 주변 틈새의 매우 작은 변화에도 민감하게 변할 수 있으므로 [8], 리블렛 판과 다중 공동 판 윗면에 얇은 테이프를 주의 깊게 부착하여 항력을 측정하고 이를 평판일 때의 값과 비교하였으나 별다른 차이를 보이지 않았다. 따라서 이후의 항력변화는 테이프를 붙였을 때와 제거하였을 때의 값을 비교하여 나타내었다. 시험부 주변의 온도 변화가 실험에 주는 영향을 최소화하기 위해서 실험은 온도 변화가 적은 시간대에 주로 수행하였으며, 평판을 여러 번 측정 하였을 경우 결과는 ±1 % 내로 일치하였다.

주유동 방향 속도는 실험실에서 자체 제작한 열선 유속계를 사용하여 측정하였다. 프롱 사이의 간격은 1 mm이고 열선의 직경은 2.5 μm이었으며, 과열비는 1.2였다. 4차의 다항식으로 속도를 보정하였으며, 기준 속도 측정은 피토티관과 마노미터 (MKS 220D)를 이용하여 측정하였다.

공동 내부의 유동을 관찰하기 위해서 연기 가시화를 수행하였다. 시험판의 중앙에 2~4개의 니크롬선을 설치하여 연기를 발생시켰고, 광원으로는 Laser Spectra사의 6 W Argon Ion Laser를 광케이블과 렌즈를 사용하여 sheet으로 만들어 사용하였으며, 사진은 디지털카메라 (EOS-10D)를 사용하여 획득하였다.

3. 실험 결과

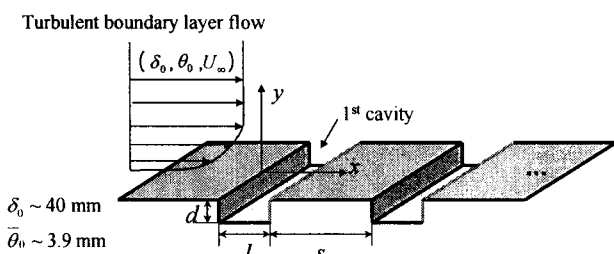


Fig. 2 Schematic diagram of the cavity configuration.

다중 공동에 의한 항력변화 연구에 있어서, 공동의 깊이 (d), 길이 (l), 공동간의 간격 (s)은 매우 중요한 매개 변수이다. 또한 공동에 진입하는 유동의 조건, 즉 경계층 두께 (δ_0) 혹은 운동량 두께 (θ_0)에 따라서 공동 내부와 외부의 유동간의 상호작용이 달라 질 것이므로 Re_θ 역시 중요한 변수가 될 수 있다. 따라서 이들의 조합에 의해 다양한 다중 공동이 만들어 질 수 있으며, 항력이 감소하거나 증가 할 수 있으리라 고 여겨진다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 다중 공동의 구성을 간략히 나타낸 것이다. δ_0 와 θ_0 는 각각 시험판의 선단으로부터 10 mm 상류에서 측정된 값이다. 공동의 형상과 배열이 항력에 주는 영향을 조사하기 위해서 20가지의 공동의 조합과 4가지 다른 Re_θ 영역에서 연구가 수행되었다.

항력의 변화를 비교하기 위한 지표로서 개념적으로 가능한 최대 항력 감소 (conceptually possible maximum drag reduction, 이하 PDR)를 고려하였다. 이상적인 경우에 공동 부분에서 항력은 0이며, 공동 마루 (crest)에서 표면 마찰 저항은 평판일 때의 값과 같다고 가정할 수 있다. 이러한 가정하에서 공동 깊이는 아무런 역할을 하지 못하며 공동의 길이 (l)와 공동들 간의 간격 (s)의 비가 매우 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 다중 공동에 의해 생길 수 있는 개념적으로 가능한 최대 항력 감소는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$PDR = \frac{l}{l+s} \times 100 (\%) \quad (1)$$

예를 들어, 단일 공동의 길이가 1 mm이고 공동들 간의 간격이 10 mm 라면 PDR은 9.1 %이다. 그러나 실제 공동 내부의 유동은 공동의 형상 비에 따라 매우 달라지며, 또한 공동들 간에 상호작용이 존재하므로 실제 다중 공동에 의한 항력의 감소는 PDR보다 작거나 또는 항력이 더 증가 할 수 있을 것이다.

PDR이 9.1 %로 일정한 경우에 다중 공동에 의한 항력 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 항력은 공동의 크기와 길이에 따라서 변하고 있는데, 특히 l/θ_0 에 따라 크게 달라지고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, $l/\theta_0 = 1.03$ 일 경우 항력은 10~17 % 증가하였으며, $l/\theta_0 = 0.51$ 인 경우에는 3~5 % 증가하였다. 특히 $l/\theta_0 = 0.26$ 과 0.13일 때, 전체 항력은 1~2 % 감소하였다. 그림에서 에러 바 (error bar)를 같이 나타내었는데 대부분

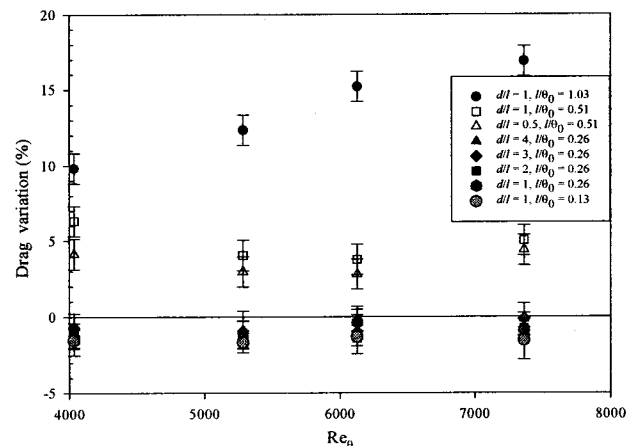


Fig. 3 Drag variation as a function of Reynolds number for the cases of PDR = 9.1 %.

분 $\pm 1\%$ 이내로서 항력의 감소량 보다 작으므로, 공동에 의한 항력감소의 결과는 의미를 지닌다. 같은 l/θ_0 에서 공동의 깊이의 변화에 따라 항력이 변하지만, l/θ_0 에 의한 변화량보다는 작다. 따라서 이러한 결과를 볼 때 같은 s/l 일 경우 다중 공동에 의한 항력의 변화는 공동의 깊이보다는 길이에 더 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

앞에서 공동의 길이와 깊이가 항력에 미치는 영향을 살펴 보았는데, 공동 사이의 간격이 항력에 주는 영향을 알아보기 위하여, 공동의 형상을 정사각형 ($l/d = 1$)으로 고정시킨 채 공동 간의 간격을 변화시키며 그에 따른 항력의 변화를 조사하였다 (Fig. 4). 주어진 크기의 공동에서 간격 (s)이 작아지면 항력이 매우 크게 증가한다. 또한 주어진 공동간의 간격에서 공동의 크기가 증가할수록 항력이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Choi and Hahn [9]의 난류 채널에서의 수치연구의 결과와 유사하다. 특히 $l/\theta_0 = 0.13$ 과 0.26 이고, $s/d \geq 10$ 일 때 $1\sim 2\%$ 항력의 감소를 얻을 수 있었다. 그림에서 공동의 크기가 큰 경우에 항력이 감소하기 위해서는 공동간의 간격이 공동의 크기가 작은 경우의 간격보다 훨씬 더 커야 함을 알 수 있다.

다중 공동에 의해 항력이 증가하거나 감소하는 이유를 알아보기 위해서 열선 유속계를 사용하여 유동 방향 속도를 측정하였다. 항력이 $1\sim 2\%$ 감소한 경우 ($d/\theta_0 = 0.26$, $l/d = 1$, $s/d = 10$)와, 항력이 50% 정도로 매우 크게 증가한 경우 ($d/\theta_0 = 0.26$, $l/d = 4$, $s/d = 10$)에 여러 유동 방향 위치에서 속도를 측정하였다. 측정 시작점에서의 $Re_\theta = 5300$ 이다. Fig. 5는 다중 공동이 있을 경우 각 유동방향 위치에서 측정된 평균 속도를 보여준다. 이때, 점선은 평판일 때 ($x/d = -1$)의 경계층 측정 결과이다. 그림에서 가로축과 세로축은 평판일 때의 벽 마찰 속도 ($u_{\tau,0}$)로 무차원화하여 나타내었다.

항력이 감소하는 경우 (Fig. 5 (a)), 공동을 지나면서 ($x/d = 0.5$) 벽 근처에서 속도가 증가하지만, 대부분의 y 위치에서 평균 속도가 거의 변하지 않는다. 공동을 지나 하류로 가면서 증가된 속도가 평판일 때의 값으로 회복되어, $x/d = 2.0$ 에서는 거의 완전히 회복한다. 공동 마루의 중앙 부분 ($x/d = 6, 39, 149, 281, 446$)에서의 속도 측정 결과를 보면, 유동방향으로 매우 먼 거리만큼 떨어져 있어도 평균 속도는 평판일 때의 결과에서 크게 벗어나지 않는다. 이는 공동을 지나 유동이 다음 공동에 도달하기 전에 급속히 평판 경계층 유동상태로 회복하기

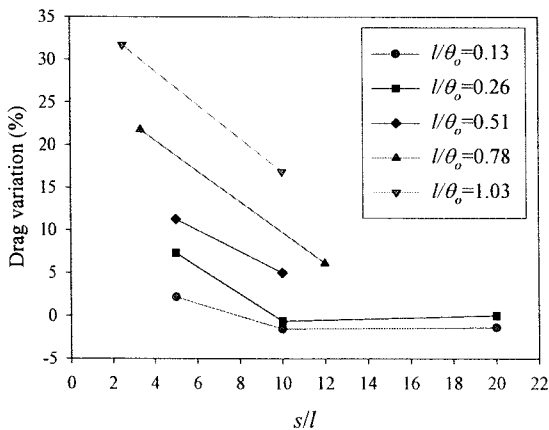
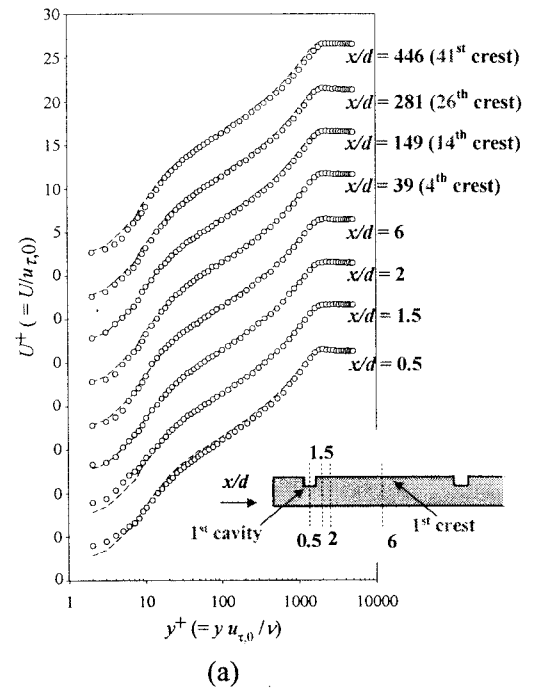
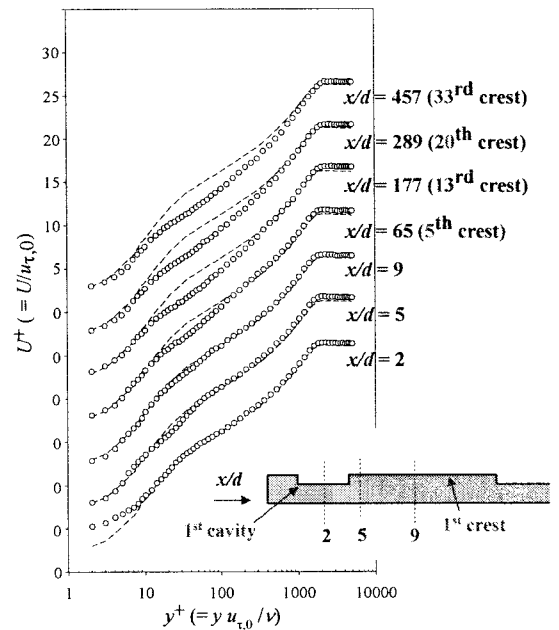


Fig. 4 Drag variation as a function of cavity spacing for different square cavities ($l = d$).



(a)



(b)

Fig. 5 Streamwise mean velocity profiles normalized by $u_{\tau,0}$ at several streamwise locations: (a) drag reducing case; (b) drag increasing case.

때문에 나타나는 결과로 여겨진다. 이 결과로부터, 항력이 감소하는 경우에는 인접한 공동들이 서로간에 영향을 주지 않고 독립적임을 알 수 있다.

항력이 증가하는 경우 (Fig. 5 (b)), 앞의 경우와는 매우 다른 양상을 보인다. 유동이 공동을 지나면서 ($x/d = 2$) 벽 근처 ($y^+ < 10$)에서 속도가 증가하지만, 이보다 바깥 부분에서는 평판일 때의 결과와 비교하여 차이를 보이지 않는다. 그러나, 공동을 지나 하류에서는 벽 근처의 속도는 빨리 회복되지만, $15 < y^+ < 40$ 의 구간에서 오히려 평균속도가 감소한다 ($x/d = 5$). 이후 속도가 감소된 영역 역시 줄어들지만 완전히 사라지지 않는다 ($x/d = 9$). 공동 마루의 중앙에서 측정된 결과들을 살펴

보면, 하류로 갈수록 ($x/d = 9, 65, 177, 289, 457$) 속도가 감소하는 구간이 점점 더 커지고 있다. 이는 공동을 지나면서 교란된 유동이 처음 평판일 때의 상태로 완전히 회복되지 못하고 다음의 공동에 도달하게 되어, 하류로 갈수록 공동에 의한 교란이 누적되고 있음을 나타낸다. 이러한 현상은 항력이 감소하는 경우에는 나타나지 않는다. 따라서 이 누적현상이 결국 다중 공동으로 인한 항력 증가의 중요한 원인 중 하나라고 생각할 수 있다. 난류 섭동은 평균 속도의 발달 과정과 비슷한 양상을 보이므로 여기서는 따로 나타내지 않았다.

유동 방향 속도 측정으로는 공동 내부의 유동 상태를 정확히 알 수가 없으므로, 공동 내부의 유동의 변화를 연기가시화를 통해 살펴보았다 (Fig. 6). 항력이 감소하는 경우, 공동 내부에 안정된 보텍스가 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 공동 외부의 유동은 공동 내부의 유동과 별다른 상호작용 없이 지나쳐 간다. 공동 내부의 안정된 보텍스가 공동 바닥면에 역방향 유동을 생성하고, 이로 인해 총 저항이 감소할 가능성이 있다. 항력이 증가하는 경우, 공동 내부에 지속 가능한 섭동(self-sustained oscillation)이 발생하여 공동 내부와 외부의 유동이 서로 활발히 상호작용을 하고 있음을 확인 할 수 있다. Hahn [6]은 전단층 불안정성 (shear-layer instability)에 의해 지속 가능한 섭동이 발생하면 공동의 형상에 의한 압력 저항이 크게 증가하여 결과적으로 총 저항이 크게 증가한다고 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 난류 경계층 내에서 유동방향으로 배열된 형 방향 공동들에 의한 표면 마찰 저항 감소 가능성에 대하여 실험적으로 분석하였다. 각 레이놀즈 수에서 20가지의 형상에 대해서 조사하였다.

조사된 대부분의 공동 형상에서 저항이 증가하였지만, 제한된 몇몇 공동 형상에서는 저항이 감소하였다. 일반적으로, 저항의 변화는 깊이, 길이, 간격 중에서 공동의 길이에 더 민감하였다. 그리고 $s/l \geq 10$ 과 $l/\theta_0 \leq 0.26$ 에서 공동의 깊이에 관계없이 저항의 감소를 얻을 수 있었으며, 이 경우들 중 최대의 저항 감소는 $s/l = 10$ 과 $l/\theta_0 = 0.13$ 에서 약 2%였다.

유동방향 속도 측정과 유동 가시화 결과로부터 항력이 감소하거나 증가하는 메커니즘을 고찰하였다. 상대적으로 작은 크기의 공동인 경우, 공동으로 인한 영향은 공동 매우 가까운 지역에서만 나타난다. 유동 변화는 공동을 지나 급속히 사라지고, 따라서 앞에 있는 공동이 뒤에 있는 공동에 전혀 영향을 주지 못하며, 서로 인접한 공동들은 독립적으로 작용한다. 공동 내부에 안정된 보텍스가 생성되고, 이 보텍스는 역방향 마찰 저항을 생성시킨다. 이로 인해 항력이 감소하게 된다.

상대적으로 큰 크기의 공동인 경우, 공동에서 전단 유동 불안정성이 발생하고 이로 인하여 지속 가능한 섭동이 생긴다. 따라서, 공동 내부의 유동과 외부의 유동이 매우 활발하게 상

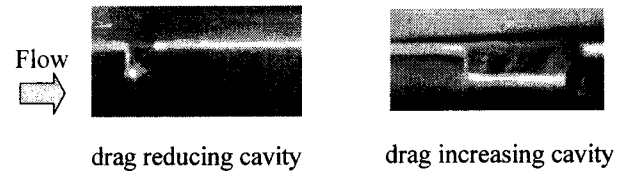


Fig. 6 Flow visualization near the cavity plate.

호작용을 하며, 이 영향은 경계층의 바깥 층에까지 미친다. 유동이 하류로 갈수록 공동에 의해 생성된 교란은 계속 축적되어, 하류에 존재하는 공동은 더 많이 교란된 난류 유동을 만나게 된다. 지속 가능한 섭동으로 인한 압력 저항의 증가가 총 저항 증가의 주요 원인이 된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 교육인적자원부의 BK21 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Tani, I., Munkata, H., Matsumoto, A. and Abe, K. 1987, "Turbulence management by groove roughness," In *Turbulence Management and Relaminarisation* (Eds. Liepman, H. W. & Narasimha, R.), Berlin: Springer-Verlag.
- [2] Choi, K.-S. and Fujisawa, N., 1993, "Possibility of drag reduction using d-type roughness," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 50, pp. 315-324.
- [3] Matsumoto, A., 1994, "Some features of turbulent boundary layers over grooved rough walls," *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol. 37, pp. 27-41.
- [4] Elavarasan, R., Ching, C. and Antonia, R., 1996, "Turbulent boundary layer over a smooth wall with widely separated transverse square cavities," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 55, pp. 227-243.
- [5] Wahidi, R., Chakroun, W. and AL-FAHED, S., 2005, "The behavior of the skin-friction coefficient of a turbulent boundary layer flow over a flat plate with differently configured transverse square grooves," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 141-152.
- [6] Hahn, S., 2002, "Cavity as a new passive device for reduction of skin friction and heat transfer," Ph. D. Thesis. Seoul National University.
- [7] Coles, D., 1953, "Measurements in the boundary layer on a smooth flat plate in supersonic flow," Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- [8] Allen, J., 1980, "An improved sensing element for skin-friction balance measurements," *AIAA J.*, Vol. 18, pp. 1342-1345.
- [9] Choi, H. and Hahn, S., 2005, "Skin-friction reduction in a turbulent boundary layer using small-scale cavities," In *2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Busan, Korea, pp. 135-144.