

국소적 초음파 가진이 난류경계층에 미치는 영향

박영수*·성형진†

Influence of Local Ultrasonic Forcing on a Turbulent Boundary Layer

Young Soo Park, Hyung Jin sung

Abstract

An experimental study was carried out to investigate the effect of local ultrasonic forcing on a turbulent boundary layer. Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) was used to probe the characteristics of the flow. A ultrasonic forcing system was made by adhering six ultrasonic transducers to the local flat plate. Cavitation which generates uncountable minute air-bubbles having fast wall normal velocity occurs when ultrasonic was projected into water. The SPIV results showed that the wall normal mean velocity is increased in a boundary layer dramatically and the streamwise mean velocity is reduced. The skin friction coefficient (C_f) decreases 60% and gradually recovers at the downstream. The ultrasonic forcing reduces wall-region streamwise turbulent intensity, however, streamwise turbulent intensity is increased away from the wall. Wall-normal turbulent intensity is almost the same near the wall but it increases away from the wall. In the vicinity of the wall, Reynold shear stress, sweep strength and production of turbulent kinetic energy were decreased. This suggests that the streamwise vortical structures are lifted by ultrasonic forcing and then skin friction is reduced.

Key Words : 항력감소(drag reduction), 미소공기방울(microbubble), 초음파(ultrasonic)

1. 서론

물과 접촉하며 운동하는 선박에 있어 마찰저항이 차지하는 비중은 전체 저항의 80%를 차지하고 있다. Robinson(1991)¹은 DNS를 통하여 난류경계층에서 표면마찰저항은 벽면과 아주 가까이 위치한 유선 와류(streamwise vortex)의 벽을 향한 속도성분(sweep)과 관계가 있는 것을 보여주었다.

따라서 항공우주, 선박추진과 소음제어분야 등 많은 분야에서 해당 난류유동에 존재하는 유선 와류를 효과적으로 제어함으로써 표면마찰 감소 효과를 가져 올 수 있다. 유동방향 와류를 직접 제어하기 위해서는 아주 미소한 감지기(sensor)와 구동기(actuator)를 무한히 필요로 하기 때문에 아직까지는 기술적으로 실현하기는 힘들다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해서 국소가진을 이용하여 유동장을 제어하고자 하는 연구가 실제 산업현장에서 활발히 이루어지고 있다.

국소가진을 이용해 경계층의 마찰저항을 줄이는 연구분야 중 대표적인 방법이 미소공기방울(microairbubble)을 경계층 내에 주입하는 방법이다. McCormick and Bhattacharyya(1973)²는 물속에

* 한국과학기술원 기계공학과

† 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

서 실험체의 표면에 구리선을 설치하여 물을 전기분해 시켜 생성된 공기방울을 이용하여 항력을 10~30%를 감소시켰다. Kato et al.(2000)³과 Kodama et al.(2000)⁴은 유속이 낮고 유입되는 공기의 양이 많을수록 마찰저항 감소량이 크며 이때 벽면부근에서의 미소공기의 양이 중요한 인자라는 것을 확인하였다. Xu et al. (2002)⁵, Ferrante and Elghobashi(2004)⁶은 DNS를 통하여 미소공기방울이 유동장에 주입된 후 벽면수직방향 속도 성분이 크게 증가하며 벽면에서 sweep motion을 야기하는 streaks의 횡방향 거리가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 Reynolds stress production의 peak 위치가 벽면에서 멀어지면서 turbulent kinetic energy의 production이 작아지는 것을 확인했다.

위와 같이 미소공기 방울을 유동장에 직접 분사하는 방법들을 사용하기 위해서는 표면에 슬롯이나 홀을 뚫어 공기방울을 유동장에 직접 유입시켜야한다. 이런 방법은 선박의 표면에 많은 변화를 요구하기 때문에 실선에 적용하는데 많은 제약이 따른다. 본 연구에서는 유동장내에 미소공기방울을 생성시켜 마찰 저항을 감소시키는 일환으로 초음파 가진을 이용하였다. 초음파 가진을 이용할 때의 장점은 벽면에 많은 변화를 요구하지 않는다는 것과 가진의 강도 조절이 용이하다는 것이다. 본 연구의 목적은 수동에서 난류경계층에 국소적으로 초음파 가진을 가해주었을 때 가진의 영향이 후류에 미치는 영향을 SPIV(Stereoscopic Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 공간적으로 살펴보는 것이다.

2. 실험 방법 및 장치

본 연구는 개방 순환형 수조 (recirculating open water channel)에서 행해졌으며 물은 원심 펌프로 순환된다. 실험은 폭 250mm, 높이 250mm, 길이 1000mm인 열린 채널에서 행해졌다. 여기에, 초음파 가진장치를 장착한 폭 150mm 길이가 1000mm인 실험부를 채널 바닥에서 200mm 높이에 설치하였다. Fig.1은 수동실험에 사용된 실험부의 개략도를 나타낸다. 선단 시작부위에는 지름 2mm인 트립 와이어(trip wire)와 이 트립 와이어의 2

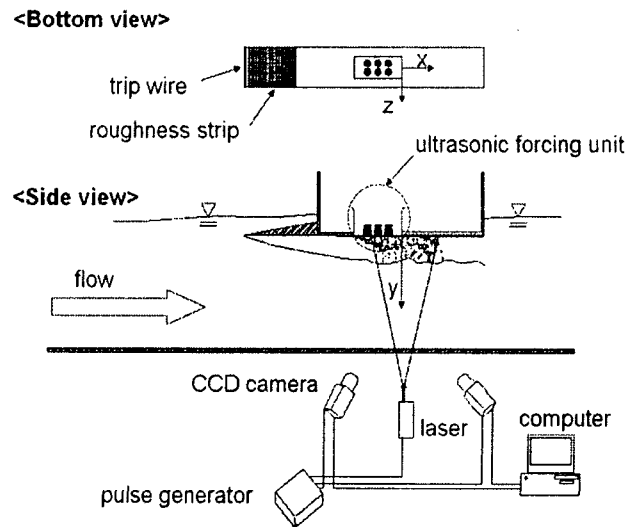


Fig. 1 Schematic diagram of experiment.

차원 효과를 줄이기 위해 150x200mm의 사포 (roughness strip, No. 60 매우 거침)를 설치하여 난류 경계층이 빨리 발달하도록 유도하였다.

초음파 가진 장치는 선단에서 460mm 떨어진 곳에 위치하며, 횡 방향 폭이 90mm 길이가 200mm이다. 좌표축의 원점은 초음파 가진장치의 중앙 끝에 위치하며 유동방향을 x축, 벽면수직방향을 y축, 횡 방향을 z축이 되도록 좌표축을 잡았다. 초음파 가진 장치는 일반적인 초음파 세정장치를 사용하였다. 초음파 세정장치는 초음파 발진 장치와 진동자(transducer)로 구성된다. 가동 원리는 초음파 발진장치로부터 진동자의 고유진동수에 해당하는 전기 신호가 인가되면 이 진동자는 공진을 일으키면서 전기신호를 기계신호로 변환한다. 이 변환된 기계신호는 수중의 매질을 통하여 진동하게 되고, 이 음압의 변화가 유동장내에 공동현상(cavitation)을 일으키게 되며 이때 빠른 속도의 미세한 기포입자들이 유동장에 생성된다. 가진 주파수를 바꾸기 위해서는 초음파 발진 장비와 진동자를 바꾸어야 하기 때문에 본 실험에서는 가진 주파수의 영향을 살펴보지는 못했다. 실험에 사용된 초음파는 27.5kHz이며 6개의 진동자를 사용하였다.

초음파 가진으로 생성된 공기방울의 양은 void fraction ratio (α)으로 나타낼 수 있다. void fraction ratio는 다음과 같이 정의 된다.

$$\alpha = \frac{Q_b}{Q_w + Q_b} \quad (1)$$

여기서 Q_b 와 Q_w 는 각각 공기방울과 물의 유량을 나타낸다. 진동부 밑의 유동장을 PIV 추적입자를 넣지 않고 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였다. 추적입자가 없기 때문에 카메라 이미지에 밝은 영역은 공기방울을 의미한다. 이를 이용하여 Q_b 를 계산하였다. 초음파 가진장치 밑에서의 ($-24 < x/\theta_0 < 0$) 평균 void fraction ratio는 2.00%이다.

초음파 가진에 따른 유동장의 변화를 3차원적으로 해석하기 위해 2대의 카메라를 사용하여 SPIV를 행하였다. 실험에는 2대의 8bit Kodak E.S 1.0S CCD 카메라가 사용되었다. stereo vision시 발생하는 영상의 왜곡을 최소화하기 위해서 tilt/shift 기능이 있는 85mm 렌즈(Nikon)를 이용하였다. 2 head Nd:YAG 레이저빔 (Big Sky Laser, Ultra, 8ns, 30mJ)을 옵티컬 암(optical arm)과 렌즈를 거쳐 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 통과하도록 하여 평판의 z축 방향 중앙에 ($z=0$) 레이저광이 생성되도록 하였다. 물과 비중이 비슷한 Hollow glass($\rho = 1.02kg/m^3, d = 8.12\mu m$)를 추적입자로 사용하였다. 레이저와 카메라를 동기시키기 위해서 pulse/delay 발생기(BNC 555 Four Channel Pulse/Delay Generator)를 사용하였다.

본 연구에서는 angular 배치방식으로 카메라를 설치하였고, Soloff et al.(1997)²이 개발한 3차원 보정기법을 적용하여 영상의 왜곡 및 굴절을 변화를 보정하였다. 3차원 보정에 사용된 calibration target은 검은색 바탕에 지름 0.5mm의 흰색 원이 2.5mm 간격으로 프린트 된 투명비닐용지(100 x 100mm)를 사용하였다. calibration은 z축 방향으로 0.5mm씩 5번 이송하였다.

촬영부의 크기는 90 x 90mm이며 실험은 가진의 영향을 폭넓게 살펴보기 위해서 $-80mm < x < 240mm$ 에서 행해졌다. 따라서 실험구간을 4등분하여 촬영하였다. 각각의 촬영위치에서 3717장의 순간 속도장을 얻어내었다. 미소조사구간 크기(interrogation window size)는 16 x 16 pixel이며 50% overlapping 되었다. 속도 벡터의 공간 분해능을 높이기 위해서 계층적 순환법(iterative

multi-grid algorithm, Scarano and Riethmuller(1999)⁸)을 SNR을 높이기 위해서 CBC(correlation based correlation, Hart(1999)⁹)기법을 사용하였다. PIV를 이용해서 얻은 속도 벡터 중에 에러벡터를 제거하기 위해서 Westerweel(1994)¹⁰이 제안한 국소 중간값 시험(local median test) 기법을 사용하였다.

3. 실험 결과

실험시 자유흐름 속도는 $U_\infty = 0.15m/s$ 로 고정되었으며 초음파 가진부가 끝나는 지점, $x^+=0$ 에서 모멘텀 두께(θ)는 3.633mm였으며 이를 근거로 한 레이놀즈 수는 $Re_\theta = 545$ 이다.

초음파 가진을 유동장에 가했을 때 가진 후류에서 유동방향에 따른 벽면마찰계수변화를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 벽면마찰계수는 가진이 없을 때의 벽면 마찰계수와와의 비(C_f/C_{f_0})로 무차원화 했기 때문에 초음파 가진 후 벽면마찰계수가 변한 비를 알 수 있다. 본 실험에서 벽면에서 가장 가까운 속도 측정 위치는 0.78mm이며 이는 $y^+=6.3$ 에 해당한다. $y^+=6.3$ 이 점성저층이라는 가정아래 u_τ 가 계산되었다. 이 u_τ 를 이용하여 벽면마찰계수를 다음과 같이 정의하였다

$$y^+ = U^+, u_\tau = \sqrt{\frac{Uv}{y}}, C_f = 2\left(\frac{u_\tau}{U_\infty}\right)^2. \quad (2)$$

아래 첨자 '0'는 가진이 없는 경우를 나타낸다.

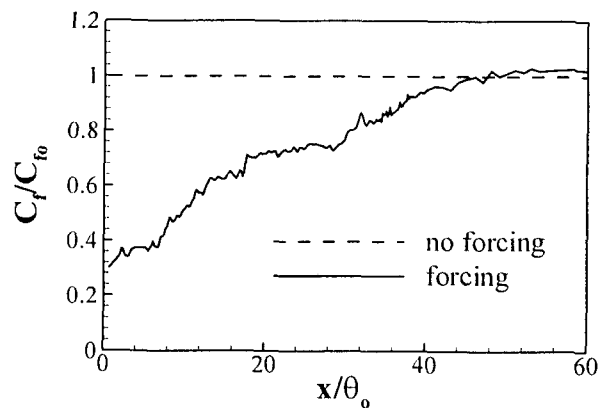


Fig. 2 Distribution of skin friction for ultrasonic forcing.

따라서 C_{f_0} 와 θ_0 는 가진이 없을 때의 벽면마찰계

다르게 적용하였다. 가진이 없을 때의 유동장은

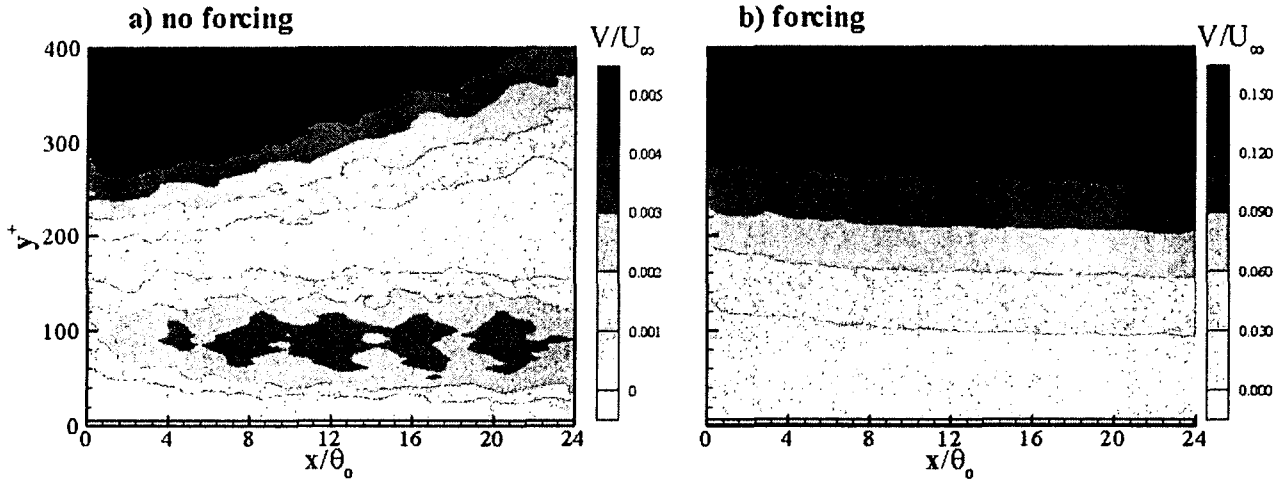


Fig. 3 Contours of wall normal mean velocity field. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

수와 모멘텀 두께이다. 이와 같이 정의된 u_r 는 CPM(Computational Preston Tube, Nitsche et al. (1983)¹¹)방법으로 측정된 값과 비교하여 3%이내의 오차를 보인다. 이 후로 유동방향은 $x=0$ 에서 가진이 없을 때의 모멘텀 두께인 θ_0 , 벽면수직방향은 $x=0$ 에서 가진이 없을 때의 벽면마찰속도인 u_m 를 이용하여 무차원화가 되었다. 모든 속도 성분은 자유단의 속도(U_∞)로 무차원화 되었다. 따라서 $x/\theta_0=0$ 은 진동부의 끝부분을 의미한다. 초음파 가진 후 벽면마찰계수는 급격히 감소한 후 서서히 가진이 없을 때의 유동장으로 수렴해 간다. 벽면마찰계수는 $x/\theta_0 < 5$ 에서 최대 60%이상 감소한다. 대략 $x/\theta_0 > 45$ 부근에서 벽면마찰계수의 비가 1보다 약간 큰 값을 보이며 서서히 가진이 없을 때의 마찰계수로 수렴한다. Fig. 2을 통하여 초음파 가진으로 생성된 미소공기방울을 이용하여 벽면마찰저항을 효과적으로 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 초음파 가진을 이용함으로 미소공기방울을 직접 유동장에 유입하는 방법을 효과적으로 대처할 수 있다.

가진이 벽면수직방향 속도에 미치는 영향을 보기 위해 Fig. 3와 같이 초음파 가진이 있을 때와 가진이 없을 때의 벽면수직방향 평균속도의 등강도 분포를 나타내었다. 두 경우에 있어 속도의 차이가 너무 크기 때문에 등강도 분포의 레벨을

가진이 있을 때의 유동장의 1/30 이하의 분포를 보인다. 난류경계층 유동이므로 초음파 가진이 없을 때 벽면수직방향 속도는 자유단 속도의 0.5% 미만의 아주 작은 값을 가진다. 하지만 초음파 가진 후 벽면수직방향 속도성분의 크기가 상당히 커진다. 가진 후 벽면수직방향 속도의 최대값이 최대 자유단 속도의 15%정도까지 증가한다. 초음파 가진을 통하여 벽면 수직방향 속도성분이 30배 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 초음파 가진으로 생성되는 미소공기방울에 영향에 기인한다. Ferrante and Elghobashi(2004)⁶는 DNS 결과를 통하여 유동장에 미소공기방울이 유입될 때 벽면수직방향 속도가 자유단의 속도의 6%정도로 증가하는 것을 확인하였다. 벽면수직방향 속도의 증가로 유동방향 속도성분이 감소하며 이를 통하여 벽면마찰이 감소한다는 것을 발견하였다. 본 실험에서도 Fig. 3을 통하여 초음파 가진으로 유동장에 미소한 공기방울이 생성되면 유동장의 벽면수직방향 속도성분이 크게 증가하기 때문에 벽면부근의 유동방향 속도가 감소하며 벽면 마찰이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

진동부(region of ultrasonic transducers)에서의 가진의 영향을 살펴보기 위해 Fig. 4에서 진동부 밑에서의 초음파 가진이 있을 때와 없을 때의 유선(streamline)의 등강도 분포를 나타내었다. $x/\delta_0=0$ 은 진동부의 끝부분, $y^+=0$ 은 진동부 표면을 의미

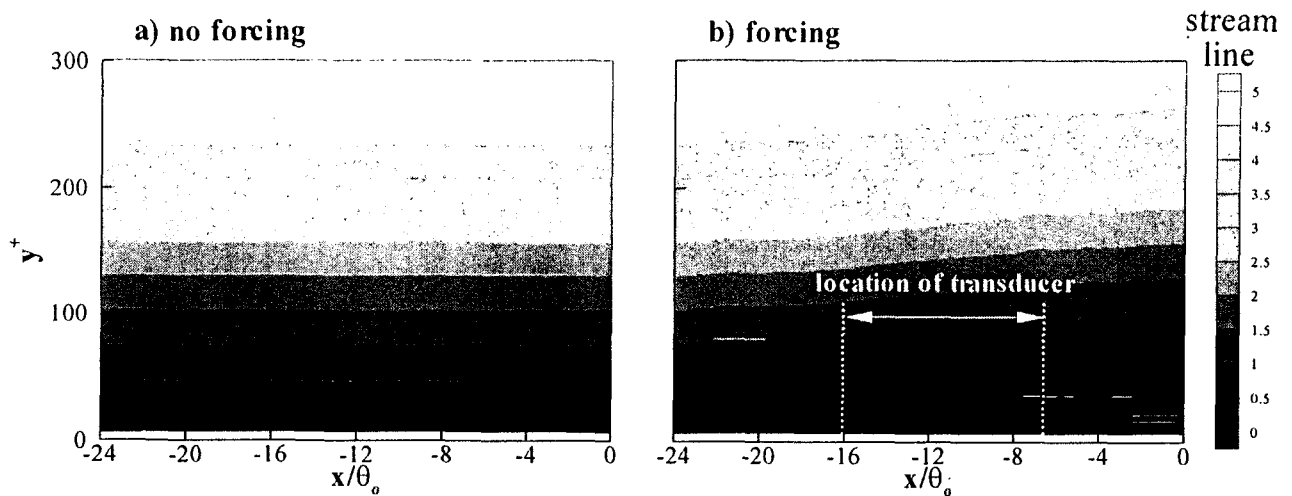


Fig. 4 Contour of streamline beneath ultrasonic transducers. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

한다. 초음파 가진이 없을 때는 유선은 벽면과 평행한 분포를 보인다. 반면에 초음파 가진이 있을 때의 유동장은 유선이 기울기를 가지며 벽면에서 떠오르는 거동을 보인다. 이는 유동장의 벽면수직방향 속도성분이 크게 증가하며 경계층의 두께가 두꺼워 지는 것을 의미한다. 이와 같은 벽면수직방향 속도성분의 증가는 초음파 가진으로 유동장내에서 캐비테이션이 발생하면서 생성되는 공기방울에 기인한다. 공기방울의 속도는 압력이 증가하는 방향과 일치한다. 진동자가 진동할 때 접촉하는 유체의 압력이 증가하는 방향이 양의 벽면수직방향($y^+ > 0$)이므로 생성되는 공기방울의 속도 역시 양의 벽면수직방향($v > 0$)이 된다. 이렇게 증가한 벽면속도에 의해 벽면부근의 유동방향의 속도기울기가 작아져서 마찰저항이 감소하게 된다. $-16 < x/\theta_0 < -7$ 인 지점에서 벽면에서의 유선의 기울기가 상대적으로 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 $-16 < x/\theta_0 < -7$ 인 지점에 진동자가 있기 때문이다. 빠른 벽면수직방향 속도성분은 진동자에 의해 생성되는 미소공기방울에 의해 생성된다. 이렇게 생성된 공기방울이 벽면에서 멀어지면서 벽면에서의 벽면수직방향 속도는 가진의 영향에서 벗어나기 시작한다. Fig. 3에서 벽면부근에서 벽면수직방향 속도성분의 변화가 작은 것은 바로 이런 현상 때문이다.

$x/\theta_0 = 5$, $y^+ = 6.3$ 에서의 순간유동장의 u' 과 v' 이 각각의 사분면에 나타나는 경우의 수와 u' 과 v' 의

곱한 값(production term : $u'v'$)의 합계를 Table. 1에 나타냈다. 가진이 없을 경우 $y^+ = 6.3$ 이기 때문에 Q4($u' > 0, v' < 0$)인 sweep이 가장 많이 발생하며 production 합계의 값이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 초음파 가진 후 sweep의 production이 약 30% 이상 감소하며 모든 production의 총 합 역시 20%가량 감소한다. 이렇게 sweep의 production의 합이 감소하는 것은 유동방향 외류가 벽면에 미치는 영향이 낮아지는 것을 의미한다. 즉 초음파 가진으로 생성된 미소공기방울들이 유동방향 외 구조를 벽면에서 밀어올리기 때문에 벽면으로 향하는 sweep의 production이 약해지고 이로 인해 벽면마찰저항이 감소하게 된다. 벽면마찰이 감소할 때 벽면부근에서 이와 같은 sweep의 production이 약해지는 것은 리블렛(Choi et al. (1993)¹²)과 미소공기방울을 유동장에 유입하는 경우(Xu et al. (2002)⁵, Ferrante & Elghobashi (2004)⁶)에서 나타난다.

	event number		production sum	
	no forcing	forcing	no forcing	forcing
Q1 ($u' > 0, v' > 0$)	665	835	0.010883	0.011802
Q2 ($u' < 0, v' > 0$)	1166	1057	-0.032127	-0.033458
Q3 ($u' < 0, v' < 0$)	733	621	0.010550	0.010066
Q4 ($u' > 0, v' < 0$)	1153	1204	-0.038731	-0.028520
summation	3,717	3,717	-0.049425	-0.04011

Table 1 Event number and production of u' and v' .

4. 결 론

국소적 초음파 가진이 난류경계층에 미치는 영향을 SPIV 기법을 사용하여 살펴보았다. 초음파 가진기를 이용하여 유동장에 캐비테이션을 발생시키면 유동장 내에 무수히 많은 미소한 공기방울이 생성된다. 이 공기방울들은 높은 벽면수직방향 속도를 가지기 때문에 유동장의 벽면수직방향 속도가 크게 증가한다. 이로 인해 벽면에서 유동방향 속도성분과 마찰저항이 감소한다. 벽면마찰은 유동방향 와류의 벽면을 향하는 높은 속도 성분에 의해 크게 증가하는데 초음파 가진으로 유동장의 평균 벽면수직방향 속도가 높아지면서 유동방향 와류가 벽면에 미치는 영향이 약화된다. quadrant analysis를 통하여 벽면마찰의 주요 원인인 sweep의 production이 벽면에서 낮아지는 것을 확인했다. 이와 같은 현상은 기존의 DNS결과들과 비교해볼 때 유선방향 와류가 벽면에 미치는 영향이 초음파 가진으로 인하여 약화된 것을 확인할 수 있다. 따라서 초음파 가진을 이용하여 직접 공기를 유동장에 주입하는 방법을 대체할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Robinson, S.K., 1991, "The Kinematics of Turbulent Boundary Layer Structure," Ph.D thesis, Stanford University
- 2) McCormick, M. and Bhattacharyya, R., 1973, "Drag Reduction of a Submersible Bull by Electrolysis," Nav. Eng. J., Vol. 85, pp. 11~16.
- 3) Kato, H., Iwashina, T., Miyanaga, M. and Yamaguchi, H., 1999, "Effect of Microbubbles on the Structure of Turbulence in a Turbulent Boundary Layer," J. Mar. Sci. Technol, Vol. 4, pp.155-162.
- 4) Kodama, Y., Kakufawa, A., Takahashi, T. and Kawashima, H., 2000, "Experimental Study on Microbubbles and Their Applicability to Ships

- for Skin Friction Reduction," Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp.582-588.
- 5) Xu, J., Maxey, M.R., and Karniadakis, G.E., 2002, "Numerical Simulation of Turbulent Drag Reduction Using Micro-bubbles," J. Fluid Mech., Vol. 468, pp. 271-281.
- 6) Ferrante, A. and Elghovashi, S., 2004, "On the Physical Mechanisms of Drag Reduction in a Spatially Developing Turbulent Boundary Layer Laden with Microbubbles," J. Fluid Mech., Vol. 503, pp.345-355.
- 7) Soloff, S.M., Adrian, R.J. and Liu, J.C., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," Meas. Sci. Technol., Vol. 8, pp. 1441~1454.
- 8) Scarano, F. and Riethmuller, M.L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," Exp. Fluids, Vol. 26, pp.513-523.
- 9) Hart, D.P., 2000, "PIV Error Correction," Exp. Fluids, Vol. 29, pp.13-22.
- 10) Westerweel, J., 1994, "Efficient Detection of Spurious Vectors in Particle Image Velocimetry Data," Exp. Fluids, Vol.10000600, pp.236~247.
- 11) Nitcher, W., Thunker, R. and Haberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method," 4th Symp. on the Turbulent Shear Flows, pp. 261~276.
- 12) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., 1993, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets," J. Fluid Mech., Vol. 255, pp.503~539.