

국소적 초음파 가진이 난류경계층에 미치는 영향

박영수* · 성형진†

Influence of Local Ultrasonic Forcing on a Turbulent Boundary Layer

Young Soo Park and 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. 서 론

유체 내에서 운동하는 물체는 표면에서 경계층이 생성되며 유체와의 상호작용으로 마찰저항을 받으면서 운동한다. 특히 물과 접촉하며 운동하는 선박에 있어 마찰저항이 차지하는 비중은 전체 저항의 80%를 차지하고 있다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 활발해진 직접 수치 모사(Direct Numerical Simulation) 방법을 통해 난류경계층 내부의 응집구조(coherent structure)가 밝혀지면서 이를 제어해 난류경계층의 마찰저항을 감소시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다. Robinson(1991)⁽¹⁾은 DNS를 통하여 난류경계층에서 표면마찰은 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. 직접 수치 모사를 통하여 벽 근처의 수직 방향 속도 성분과 반대 위상을 갖는 흡입/분사를 벽면 전체에 적용함으로써 유선 와도(streamwise vorticity)를 약화시키고 결과적으로 표면 마찰도 감소시켰다(Choi et al. (1994)⁽²⁾). 그러나 이러한 제어는 아주 미소한 감지기(sensor)와 구동기(actuator)를 무한히 필요로 하기 때문에 아직까지는 기술적으로 실현하기는 힘들다. 현장에서 실용화를 위해서는 리블렛과 유동벽면과 같은 수동적인 제어(passive control) 방법들이 수행되어 왔다. 하지만 이런 수동제어 방법은 방법이 단순하다는 장점이 있는 반면에 유동장의 변화에 대응할 수 없기 때문에 유동조건에 따라 제어의 결과가 다르게 나타나는 단점이 있다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해서 국소가진을 이용하여 유동장을 제어하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

국소가진을 이용해 경계층의 마찰저항을 줄이는 연

†한국과학기술원 기계공학과
E-mail: hjsung@kaist.ac.kr

*한국과학기술원 기계공학과

구분야 중 대표적인 방법이 미소공기방울(microair-bubble)을 경계층 내에 주입하는 방법이다. McCormick and Bhattacharyya(1973)⁽³⁾는 물속에서 실험체의 표면에 구리선을 설치하여 물을 전기분해 시켜 생성된 공기방울을 이용하여 항력을 10~30%를 감소시켰다. Madavan et al.(1984)⁽⁴⁾은 1970년대에 활발히 연구된 미소공기방울을 이용한 마찰저항 감소 실험을 재현하여 마찰저항을 최대 80% 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다. Pal et al.(1988)⁽⁵⁾과 Kato et al.(2000)⁽⁶⁾과 Kodama et al.(2000)⁽⁷⁾은 유속이 낮고 유입되는 공기의 양이 많을수록 마찰저항 감소량이 크며 이 때 벽면부근에서의 미소공기의 양이 중요한 인자라는 것을 확인하였다. Xu et al.(2002)⁽⁸⁾는 DNS 계산을 통하여 유동장에 유입되는 공기방울의 크기가 작을수록 마찰저항 감소량이 크며 미소공기방울이 유입되면 벽면의 streak 구조가 벽면에서 떠오르며 streak간의 거리가 멀어지는 것을 확인했다. Ferrante and Elghobashi(2004)⁽⁹⁾은 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 마찰저항을 감소시키는 일환으로 초음파 가진을 이용하였다. 초음파 가진을 이용할 때의 장점은 벽면에 많은 변화를 요구하지 않는다는 것과 가진의 강도 조절이 용이하다는 것이다. 실험에 사용된 초음파 가진은 초음파 세척기의 원리를 이용한 것이다. 초음파 세척기는 유체내부에 압력변화를 발생시켜 캐비테이션(cavitation)을 일으킨다. 이렇게 캐비테이션이 발생하면 미소공기방울이 유동장내에 생성되기 때문에 미소공기방울을 유동장에 직접 넣어주는 방법을 대체할 수 있다. 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. 또한 기존의 실험을 통한 연구들이 관찰하지 못한 난류통계량들을 살펴보고자 한다. 이를 통하여 미소공기방울이 유동장에 유입되어 마찰저항이 감소하는 원리를 DNS결과와 비교하여 살펴보고자 한다. 초음파 가진은 강한 벽면 수직방향 속도 성분을 가지는 미세한 공기방울을 유동장에 생성한다. 이 공기방울은 벽면 마찰의 주요 원인인 난류 응집구조를 벽면에서 밀어내며 이에 따라 벽면 속도와 벽면 마찰 계수가 감소한다. 벽면 난류구조의 변화를 관찰하기 위해서 레이놀즈 전단응력 성분과 turbulent kinetic energy의 production 등의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법 및 장치

본 연구는 개방 순환형 수조(recirculating open water channel)에서 행해졌으며 물은 원심 펌프로 순환된다. 실험은 폭 250 mm, 높이 250 mm, 길이 1000 mm인 열린 채널에서 행해졌다. 여기에, 초음파 가진장치를 장착한 폭 150 mm 길이가 1000 mm인 실험부를 채널 바닥에서 200 mm 높이에 설치하였다. Fig. 1은 수동실험에 사용된 실험부의 개략도를 나타낸다. 유동이 실험부와 충돌하였을 때 박리를 막기 위해서 10°의 각도를 가지는 310 mm의 선단(leading-edge)을 설치하였다. 선단 시작부위에는 지름 2 mm인 트립 와이어(trip wire)와 이 트립 와이어의 2차원 효과를 줄이기 위해 150×200 mm의 사포(roughness strip, No. 60 매우 거침)를 설치하여 난류 경계층이

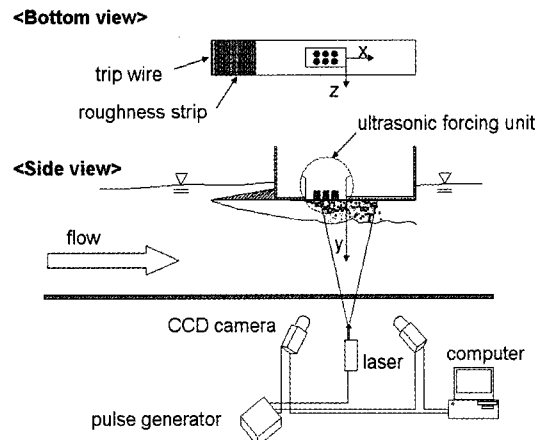


Fig. 1. Schematic diagram of experiment.

빨리 발달하도록 유도하였다.

초음파 가진 장치는 선단에서 460 mm 떨어진 곳에 위치하며, 횡 방향 폭이 90 mm 길이가 200 mm이다. 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 유동장 내에 공동현상(cavitation)을 일으키게 되고 이때 빠른 속도의 미세한 기포입자들이 유동장에 생성된다. 가진 주파수를 바꾸기 위해서는 초음파 발진 장비와 진동자를 바꾸어야 하기 때문에 본 실험에서는 가진 주파수의 영향을 살펴보는 못했다. 실험에 사용된 초음파는 27.5 kHz이며 6개의 진동자를 사용하였다. 가진으로 생성되는 기포입자 영상의 크기는 1 pixel(80 μ m)이다. 입자영상의 크기가 실제 입자크기보다 큰 것을 감안할 때 기포입자의 크기는 수 마이크로미터라고 생각된다. 이렇게 작은 크기로 생성이 되지만 기포입자들이 구름형상으로 뭉쳐서 생성되기 때문에 유동장에 충분한 영향을 줄 수 있다. 수동을 끄고 생성되는 공기 입자의 속도를 측정했을 때 입자의 속도는 6.7 m/s이다. 공기기포들은 생성 후 빠른 속도로 물에 녹아 소멸되기 때문에 초음파 가진 장비의 후류에서는 공기기포들이 존재하지 않는다. 따라서 기존의 일반적인 PIV 기법을 사용하여 손쉽게 속도장을 측정할 수 있다.

초음파 가진으로 생성된 공기방울의 양은 void fraction ratio(α)로 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 85 mm 렌즈(Nikon)를 이용하였다. 2 head Nd:YAG 레이저빔 (Big Sky Laser, Ultra, 8 ns, 30 mJ)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($\rho = 1.02 \text{ kg/m}^3$, $d = 8.12 \mu\text{m}$)를 추적입자로 사용하였다. 레이저와 카메라를 동기 시키기 위해서 pulse/delay 발생기(BNC 555 Four Channel Pulse/Delay Generator)를 사용하였다.

본 연구에서는 angular 배치방식으로 카메라를 설치하였고, Soloff et al.(1997)⁽¹⁰⁾이 개발한 3차원 보정 기법을 적용하여 영상의 왜곡 및 굴절을 변화를 보정하였다. 3차원 보정에 사용된 calibration target은 검은색 바탕에 지름 0.5 mm의 흰색 원이 2.5 mm 간격으로 프린트 된 투명비닐용지(100 × 100 mm)를 사용하였다. calibration은 z축 방향으로 0.5 mm씩 5번 이상하였다.

촬영부의 크기는 90 × 90 mm이며 실험은 가진의 영향을 폭넓게 살펴보기 위해서 $-80 \text{ mm} < x < 240 \text{ mm}$ 에서 행해졌다. 따라서 실험구간을 4등분하여 촬영하였다. 각각의 촬영위치에서 3717장의 순간 속도장을 얻어내었다. 미소조사구간 크기(interrogation window size)는 16 × 16 pixel이며 50% overlapping 되었다. 속도 벡터의 공간분해능을 높이기 위해서 계층적 순환법(iterative multi-grid algorithm, Scarano and Riethmuller(1999)⁽¹¹⁾)을 SNR을 높이기 위해서 CBC(correlation based correlation, Hart(1999)⁽¹²⁾)기법을 사용하였다. PIV를 이용해서 얻은 속도 벡터 중에 에러벡터를 제거하기 위해서 Westerweel(1994)⁽¹³⁾이 제안한 국소 중간값 시험(local median test) 기법을 사용하였다.

3. 실험 결과

PIV로 측정된 속도의 신뢰도를 보여주기 위해서 초

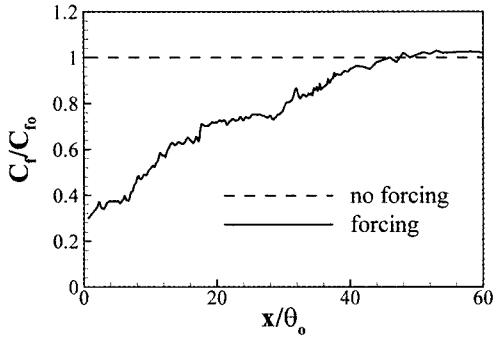


Fig. 2. Distribution of skin friction for ultrasonic forcing.

음파 가진이 없을 때의 난류경계층의 유동을 Spalart (1988)⁽¹⁴⁾의 DNS 결과($Re_0 = 670$)와 함께 Fig. 2와 같이 비교하였다. 실험시 자유흐름 속도는 $U_\infty = 0.15$ m/s으로 고정되었으며 초음파 가진부가 끝나는 지점, $x^+ = 0$ 에서 모멘텀 두께(θ)는 3.633 mm였으며 이를 근거로 한 레이놀즈 수는 $Re_0 = 545$ 이다. PIV로 측정된 유동방향 평균속도, 유동방향 난류강도, 벽면 수직방향 난류강도 성분이 DNS결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. wake 영역에서 실험과 DNS가 보이는 불일치는 수조의 깊이(48)가 경계층두께에 비하여 충분히 깊지 않기 때문이라 생각된다.

초음파 가진을 유동장에 가했을 때 가진 후류에서 유동방향에 따른 벽면마찰계수변화를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 벽면마찰계수는 가진이 없을 때의 벽면 마찰계수와의 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 0.78 mm이며 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.

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

아래 첨자 'o'는 가진이 없는 경우를 나타낸다. 따라서 C_{f_0} 와 θ_0 는 가진이 없을 때의 벽면마찰계수와 모멘텀 두께이다. 이와 같이 정의된 u_τ 는 CPM(Computational Preston Tube, Nitsche et al.(1983)⁽¹⁵⁾)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_{τ_0} 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. 3을 통하여 초음파 가진으로 생성된 미소공기방울을 이용하여 벽면마찰 저항을 효과적으로 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 초음파 가진을 이용함으로 미소공기방울을 직접 유동장에 유입하는 방법을 효과적으로 대체할 수 있다.

벽면마찰계수는 벽면에서의 유동방향 평균속도의 기울기에 비례한다. 따라서 가진이 유동방향 평균속도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 4와 같이 초음파 가진이 있을 때와 가진이 없을 때의 유동방향 평균 속도의 등강도 분포를 도시해보았다. 실험 촬영부

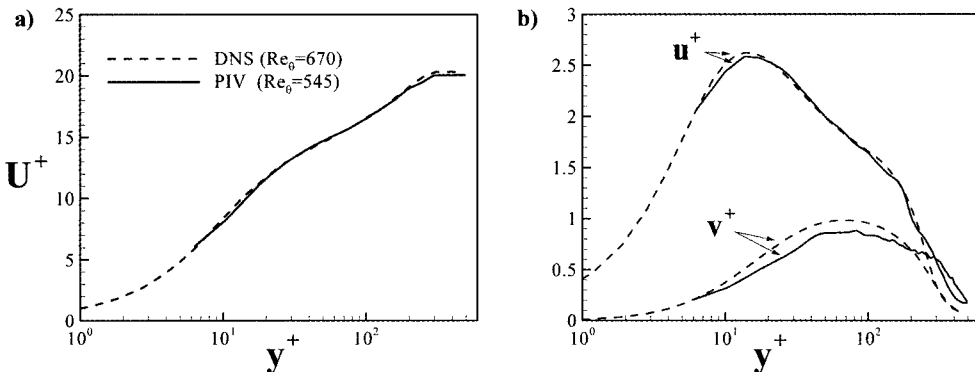


Fig. 3. PIV velocity measurement with DNS. a) streamwise mean velocity, b) turbulent intensity.

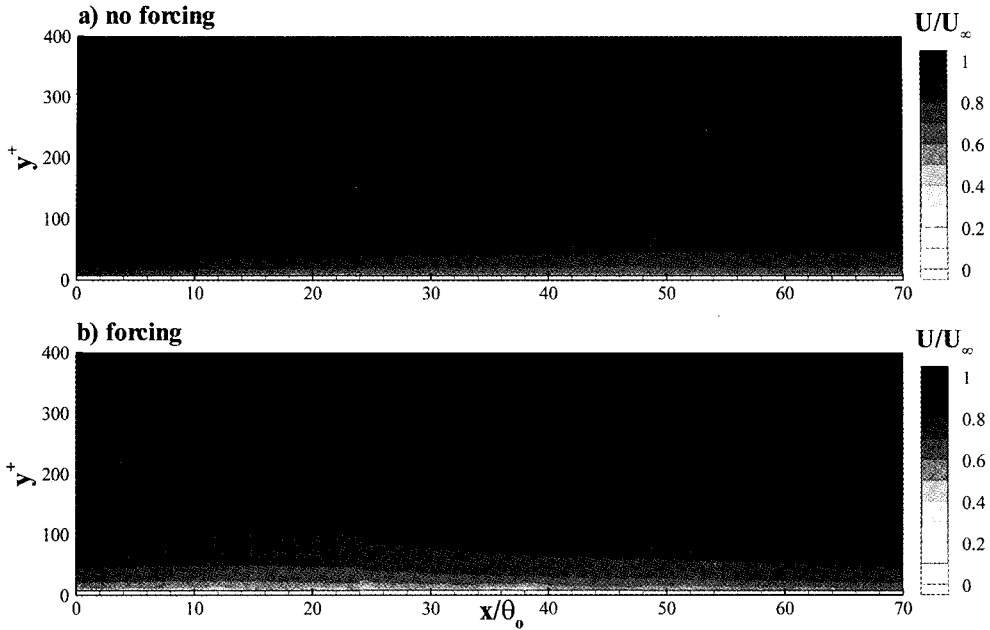


Fig. 4. Contours of streamwise mean velocity field. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

3곳의 평균속도분포를 연결한 그림이기 때문에 연결 부위인 $x/\theta_0 = 24, 56$ 에서 약간의 불일치를 보이지만 유동장의 변화를 잘 나타낸다. 가진이 없을 때의 유동방향의 분포를 보면 벽면에 대해 수평하게 분포하며 후류로 가면서 경계층이 서서히 성장하는 것을 볼 수 있다. 등강도의 폭의 변화를 보면 벽면부근에서 폭이 좁고 위로 올라갈수록 등강도의 폭이 넓어지게 되며 $y^+ > 200$ 인 영역에서는 모두 같은 등강도 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 벽면영역에서 등강도의 폭이 좁은 것은 그만큼 속도가 벽면부근에서 상대적으로 큰 기울기를 가지는 것을 의미한다. 초음파 가진

이 가해진 후 유동방향평균 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 $x/\theta_0 < 24$ 인 영역에서 유동방향 속도가 크게 감소한다. $x/\theta_0 \geq 24$ 에서부터 가진의 영향이 서서히 약해지면서 크게 감소한 유동방향속도가 서서히 가진의 영향이 약해지면서 가진이 없을 때의 유동장으로 수렴해간다. 또한 속도가 감소한 영역에서 유동방향속도의 등강도 폭들이 가진이 없을 때에 비하여 넓어진다. 등강도의 폭이 넓어진 것을 통하여 속도의 기울기가 감소한 것을 알 수 있다. 이렇게 벽면에서 속도의 등강도 폭이 넓어지는 것을 확인함으로써 초음파 가진이 벽면 마찰을 감소시키는 것을 확인할 수

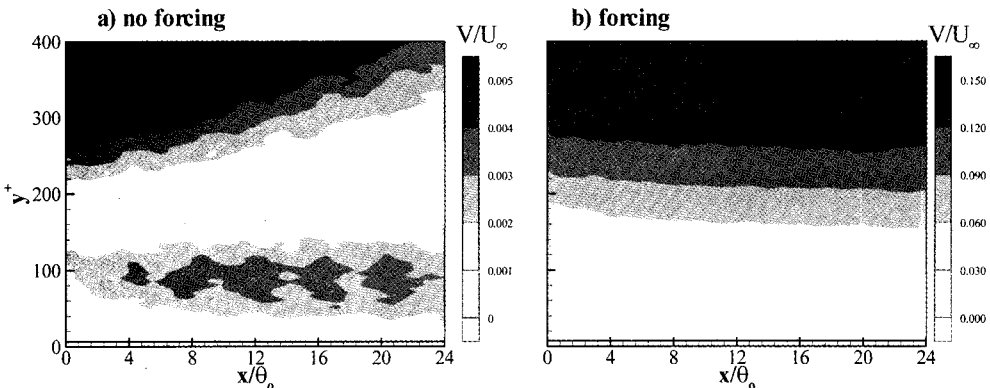


Fig. 5. Contours of wall normal mean velocity field. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

있다. 또한 가진이 없을 때 벽면과 평행하게 보인 등강도분포가 $x/\theta_0 < 24$ 에서 벽면에서 약간의 기울기를 가지며 떠오르는 것을 통하여 경계층의 두께가 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 가진의 영향이 $x/\theta_0 < 24$ 에서 강하게 나타나며 유동장이 큰 변화를 보이기에 이 후의 등강도 분포는 $0 < x/\theta_0 < 24$ 인 부분에 대하여 자세히 살펴보겠다.

가진이 벽면수직방향 속도에 미치는 영향을 보기 위해 Fig. 5와 같이 초음파 가진이 있을 때와 가진이 없을 때의 벽면수직방향 평균속도의 등강도 분포를 나타내었다. 두 경우에 있어 속도의 차이가 너무 크기 때문에 등강도 분포의 레벨을 다르게 적용하였다. 가진이 없을 때의 유동장은 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)⁽⁹⁾는 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. 4와 5를 통하여 초음파 가진으로 유동장에 미소한 공기방울이 생성되면 유동장의 벽면수직방향 속도성분이 크게 증가하기 때문에 벽면부근의 유동방향 속도가 감소하며 벽면마찰이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 6은 초음파가진 후류의 유동방향 평균속도 분포를 네 곳($x/\theta_0 = 5, 20, 40, 60$)에서 나타낸 것이다. 벽면부의 변화를 자세히 살펴보기 위해 벽면 수직 거리를 로그를 사용하였다. 초음파 가진 후 경계층 내부의 전 유동장의 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. $x/\theta_0 = 5$ 에서는 가진으로 인한 속도의 감소량이 전영역에 대해서 상당히 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 하지만 후류로 가면서 벽면영역부터 서서히 가진의 영향에서 벗어나게 된다. $x/\theta_0 = 20$ 에서는 벽면부근에서의 속도 감소량이 작아지며 $x/\theta_0 = 40$ 에서는 벽

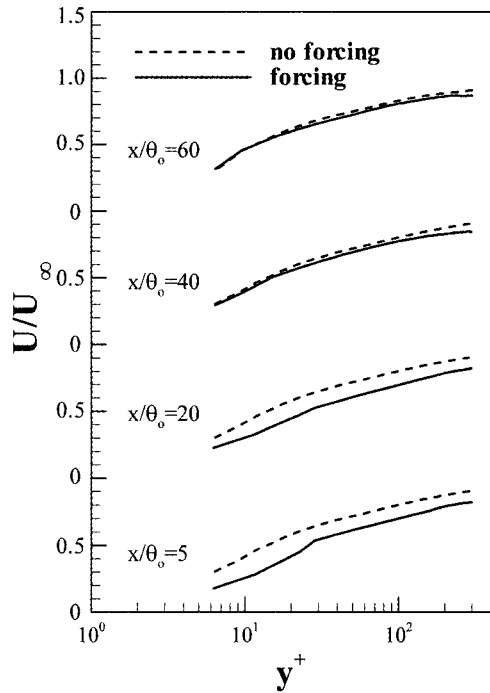


Fig. 6. Streamwise mean velocity profiles.

면부근($y^+ < 20$)의 속도가 거의 가진이 없을 때의 유동장으로 수렴한다. 반면에 로그영역에서는 가진의 효과로 $x/\theta_0 = 60$ 에서도 아직까지 변화의 양은 작지만 유동방향 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 경계층에서 벽면마찰은 벽면에서의 속도에 의해 정해지므로 $0 < x/\theta_0 < 20$ 에서와 같은 뚜렷한 벽면부근 속도감소는 벽면마찰감소를 야기한다. 이렇게 벽면부근 속도가 감소하면 u_r 가 감소하며 점성저층(viscous sublayer)이 증가한다. 이 때 경계층의 속도분포는 위로 떠오르는 현상(upward shift)을 보이며 이는 벽면마찰이 감소하는 유동의 대표적인 특징이다. 이와 같은 경향은 유동장에 지속적인 분사(Sano and Hirayama (1985)⁽¹⁶⁾, Park and Choi(1999)⁽¹⁷⁾, Krogstad and Kourakine(2000)⁽¹⁸⁾)와 주기적인 분사/흡입(Park et al.(2001)⁽¹⁹⁾, Rhee and Sung(2001)⁽²⁰⁾, Park et al.(2003)⁽²¹⁾)과 미소공기방울을 유동장에 유입하는 방법(Ferrante and Elghobashi(2004)⁽⁹⁾)에서도 나타난다. 위의 방법의 공통점은 유동장에 벽면수직방향 속도성분의 가진을 가해주는 것이다.

벽면 수직방향 평균속도 분포의 변화를 네 곳($x/\theta_0 = 5, 20, 40, 60$)에서 무차원화 하여 Fig. 7에 나타내

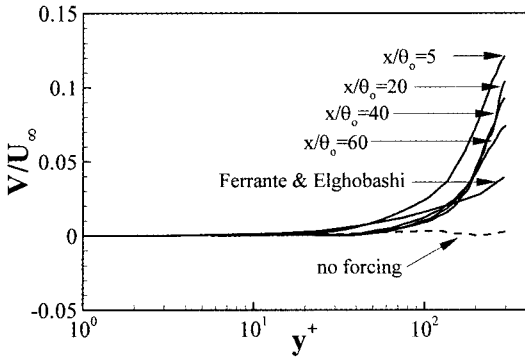


Fig. 7. Wall normal mean velocity profiles.

었다. 유동방향 속도 성분이 가진 후 전 영역에서 감소한 반면 벽면수직방향 속도 성분은 가진 후 전체적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 벽면부근($y^+ < 20$)에서 가진의 영향은 모든 측정 위치에서 미미한 영향을 보인다. $x/\theta_0 = 5$ 인 경우를 제외하고는 벽면 수직방향 속도성분의 변화는 $y^+ < 50$ 에서도 거의 나타나지 않는다. 하지만 벽면에서 멀어지면서 가진의 영향이 점차적으로 커지면서 $y^+ = 300$ 부근에서는 가진이 없을 때 보다 30배 이상 큰 값을 보인다. 벽면속도의 증가량이 후류로 가면서 감소하지만 $x/\theta_0 = 60$ 에서도 가진의 영향이 뚜렷하게 나타난다. 이런 경향은 미소공기방울이 유동장에 유입된 후 후류에서 벽면수직방향 속도 성분을 측정된 DNS 결과(Ferrante and Elghobashi (2004)⁽⁹⁾)에서도 보인다.

진동부(region of ultrasonic transducers)에서의 가진의 영향을 살펴보기 위해 Fig. 8에서 진동부 밑에서의 초음파 가진이 있을 때와 없을 때의 유선(streamline)의 등강도 분포를 나타내었다. $x/\delta_0 = 0$ 은

진동부의 끝부분, $y^+ = 0$ 는 진동부 표면을 의미한다. 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 속도 기울기가 작아져서(Fig. 3, 6) 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. 5, 7에서 벽면부근에서 벽면수직방향 속도성분의 변화가 작은 것은 바로 이런 현상 때문이다.

평균속도장의 변화를 살펴보았는데 이제부터는 난류강도 성분의 변화를 살펴보겠다. Fig. 9는 자유단 속도로 무차원화 된 유동방향 난류강도성분의 등강도 분포도이다. 가진이 없을 때 벽면부근에서 난류강도가 높은 영역이 존재하며 벽면에서 멀어질수록 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 가진 후 벽면부근

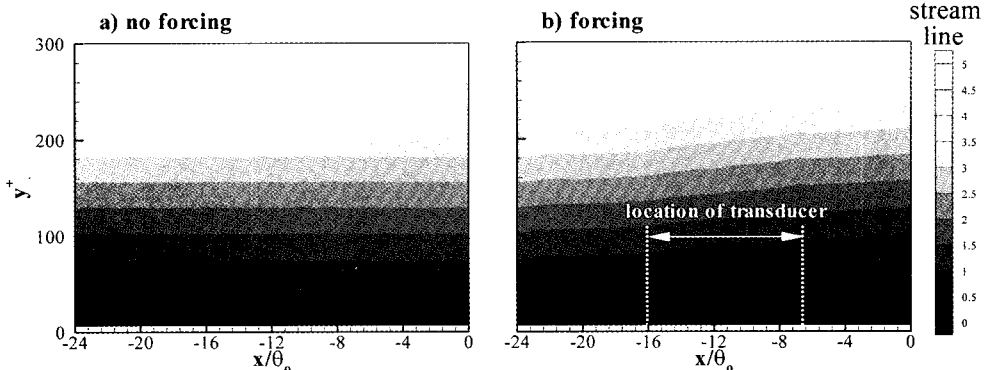


Fig. 8. Contour of streamline beneath ultrasonic transducers. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

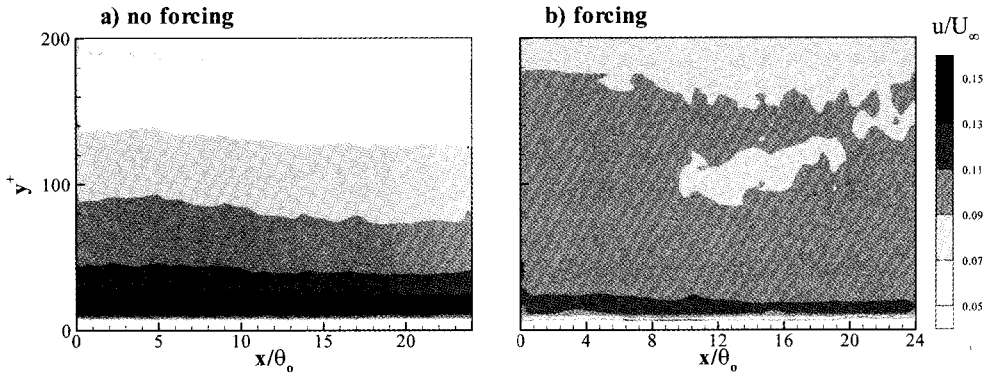


Fig. 9. Contours of streamwise turbulent intensity field. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

에서 유동방향 난류강도가 20% 가량 낮아지는 것을 볼 수 있다. 초음파 가진으로 벽면에서 감소한 유동방향 난류강도는 벽면에서 멀어지면서 가진이 없을 때 보다 오히려 증가하는 현상을 보인다(\$y^+ > 100\$). 이와 같이 벽면부근 유동방향 난류강도 성분이 감소하는 현상은 마찰저항이 감소하는 유동에서 자주 나타난다. 리블렛의 경우 마찰저항이 감소하면 벽면부근 유동방향 난류강도 성분이 감소하며 반대로 마찰저항을 증가하면 유동방향 난류강도 성분이 증가한다(Choi et al. (1993)⁽²²⁾). 벽면에서 지속적인 분사를 통해 벽면 마찰저항이 감소하는 경우에는 유동방향 난류성분이 감소한다(Park & Choi (1999)⁽¹⁷⁾, Kim & Sung (2003)⁽²³⁾). Kato et al. (1999)⁽⁶⁾은 유동장에 미소공기방울(micro air bubbles)을 유입하여 벽면마찰저항이 감소할 경우 유동방향 난류강도가 감소하는 것을 확인하였으며 이 때 감소량은 마찰저항의 감소량에 비례하는 것을 살펴보았다.

벽면수직방향 난류강도성분의 등강도 분포가 Fig. 10에 도시되었다. 벽면수직방향 난류강도 성분은 벽면수직방향 평균속도와 같이 벽면부근에서는 큰 변화를 보이지 않는다(\$y^+ < 100\$). 하지만 벽면에서 멀어지면서 벽면수직방향 난류강도 성분이 크게 증가한다. 초음파 가진 후 평균속도와 난류강도의 변화량을 살펴보면 유동방향보다 벽면수직방향성분 쪽의 변화가 더 크다. 이는 초음파 가진으로 생성된 공기방울들은 빠른 벽면수직방향 속도성분을 가지기 때문에 벽면수직방향 속도성분과 난류강도의 변화량이 유동방향 성분보다 크며 가진의 영향이 후류에서 더 오래 지속된다.

\$K^*\$ (turbulent kinetic energy distribution)의 등강도 분포의 변화를 살펴보았다(Fig. 11). \$K^*\$은 다음과 같이 정의 된다

$$K^* = \frac{2u^2}{v^2 + w^2} \quad (3)$$

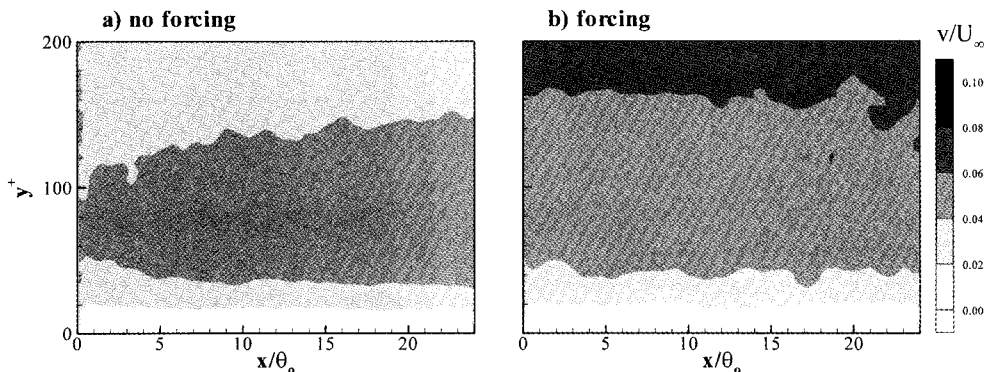


Fig. 10. Contours of wall normal turbulent intensity field. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

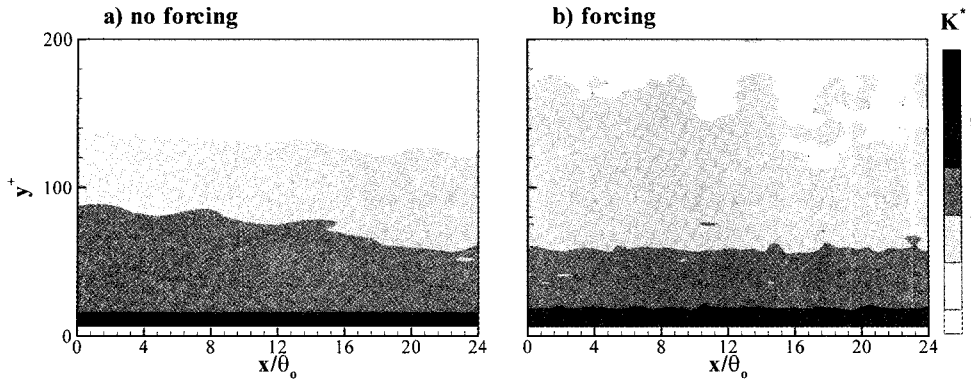


Fig. 11. Contours of turbulent kinetic energy distribution. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

횡방향 속도성분 w 는 여기서 그려지지는 않았지만 벽면수직방향 성분인 v 와 비슷한 경향을 보인다. 초음파 가진 후 벽면에서는 변화를 보이지 않지만 벽면에서 멀어지면서 가진이 없을 때 보다 증가하지만 증가량에 있어서 v 보다 작다. 초음파 가진이 없을 때 K^* 는 벽면에서 상당히 큰 값을 가진 후 벽면에서 멀어지면서 감소한다. $y^+ > 150$ 에서는 거의 일정한 크기를 보인다. 초음파 가진 후 벽면에서의 높은 K^* 의 분포는 현저히 감소하게 된다. 이와 같은 변화는 벽면부근에서의 유동방향 난류강도(u)의 감소에 기인한다. 하지만 벽면에서 멀어지면서 초음파 가진 후 K^* 는 가진이 없을 때 보다 증가한다. 따라서 초음파 가진 후 K^* 의 분포는 좀 더 균일한 분포를 가진다. 이와 같이 가진 후 벽면부근 유동방향 난류강도가 감소하여 K^* 가 감소하는 것은 유동장에 지속적인 분사를 해주는 경우에 나타난다(Kim and Sung(2003)⁽²³⁾).

Fig. 12는 레이놀즈 전단응력의 등강도 분포도이다.

레이놀즈 전단응력은 유동방향 난류강도와 유사한 거동을 보인다. 가진 후 벽면부근에서 레이놀즈 전단응력이 감소한 후 벽면에서 멀어지면서 가진이 없을 때 보다 증가한다. 벽면부근의 레이놀즈 전단응력은 마찰저항을 유발하는 유동방향 와류의 벽면을 향하는 유동(sweep)과 벽면에서 올라오는 유동(ejection)의 영향을 많이 받는다. 이렇게 벽면부근의 레이놀즈 전단응력의 감소를 통하여 유동방향 와류가 벽면에 미치는 영향이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Ferrante & Elghobashi (2004)⁽⁹⁾는 벽면마찰저항이 감소할 때 레이놀즈 전단응력성분이 벽면에서 감소하며 최고점이 벽면에서 멀어지는 것을 확인하였으며 이 때 유동방향 와류의 강도가 낮아지며 벽면과의 거리가 멀어지는 것을 확인하였다.

초음파 가진이 난류운동에너지의 production에 미치는 영향을 보기위해 Fig. 13과 같이 등강도 분포도를 도시하였다. P는 다음과 같이 정의 된다

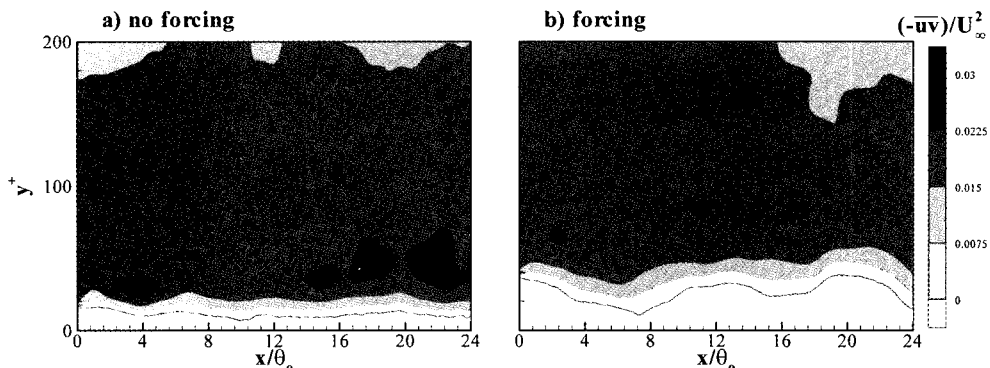


Fig. 12. Contours of Reynolds shear stress field. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

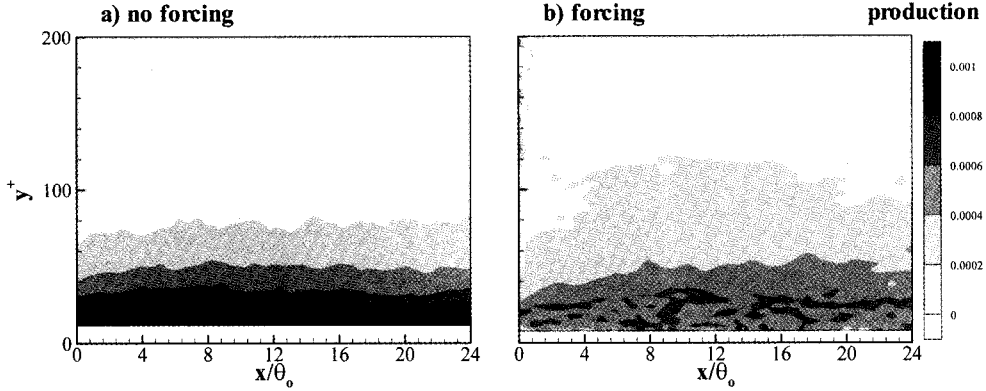


Fig. 13. Contours of production of turbulent kinetic energy. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

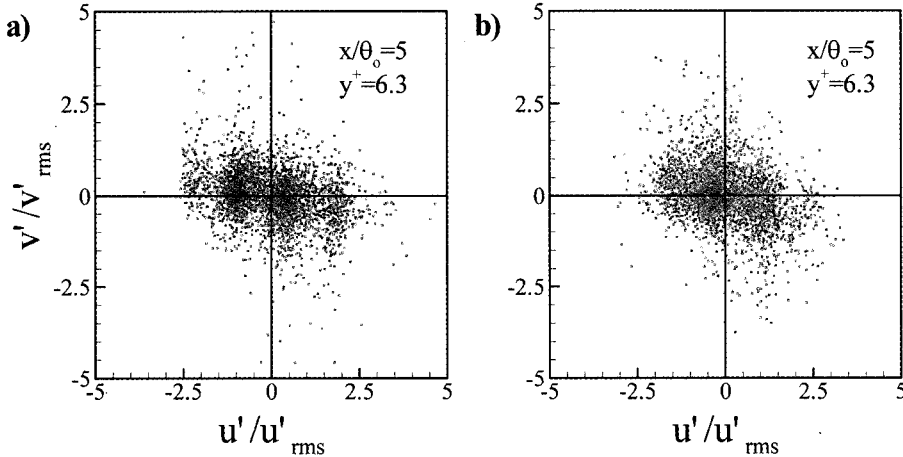


Fig. 14. Distribution of u' and v' at $x/\theta_0=5$ and $y^+=6.3$. a) no forcing, b) ultrasonic forcing.

$$production = (-\overline{uv}) \frac{\partial U}{\partial y}. \quad (4)$$

초음파 가진 후 벽면에서 속도의 기울기($\partial U/\partial y$)가 감소하고(Fig. 4) 또한 레이놀즈 전단응력($-\overline{uv}$) 역시 감소하기(Fig. 12) 때문에 벽면에서 P가 현저하게 작아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향은 미소공기 방울의 유입으로 마찰저항이 감소하는 유동장에 나타난다(Ferrante & Elghobashi (2004)⁹⁾).

$x/\theta_0=5$, $y^+=6.3$ 에서의 u' 와 v' 의 분포를 u'_{rms} 와 v'_{rms} 로 무차원화하여 quadrant analysis를 했다(Fig. 14). 가진이 없을 때의 u' , v' 의 분포를 보면 x축 방향으로 길게 늘어져있는 형상을 보인다. Kim et al. (1987)²⁴⁾은 벽면부근에서 이러한 u' 과 v' 의 형상을 채널 DNS 계산을 통하여 확인했다. 이 때 $y^+ > 12$ 에서

는 $u' < 0$ 고 $v' > 0$ 은 ejection(Q2)이 많이 발생하며 $6 < y^+ < 12$ 에서는 $u' > 0$ 고 $v' < 0$ 은 sweep(Q4)이 지배적이며 $y^+ > 30$ 이상이면 u' , v' 의 형상이 원형에 가까운 형상을 보이면서 상관관계가 낮아지는 것을 확인하였다. 초음파 가진 후 x축 방향으로 길게 늘어진 형상이 다소 상관관계가 낮아진 원형의 형상을 보이는 것을 볼 수 있다. 또한 이 때 원점에서 멀리 위치하는 강한 sweep을 보이는 경우도 현저하게 감소한다.

$x/\theta_0=5$, $y^+=6.3$ 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 합

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

	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

계의 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 와류가 벽면에 미치는 영향이 낮아지는 것을 의미한다. 즉 초음파 가진으로 생성된 미소공기방울들이 유동방향 와구조를 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)⁽²²⁾)과 미소공기방울을 유동장에 유입하는 경우(Xu et al. (2002)⁽⁸⁾, Ferrante & Elghobashi (2004)⁽⁹⁾)에서 나타난다.

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 약해진다. 이렇게 유동방향 와가 벽면에 미치는 영향이 약해지는 결과로 유동방향 난류강도와 레이놀즈 전단응력이 벽면에서 감소한다. quadrant analysis를 통하여 벽면마찰의 주요원인인 sweep의 production이 벽면에서 낮

아지는 것을 확인했다. 또한 벽면에서 turbulent kinetic energy distribution(K^*)와 turbulent kinetic energy production(P)이 감소하는 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.

참고문헌

- 1) Robinson, S. K., 1991, "The Kinematics of Turbulent Boundary Layer Structure", Ph.D thesis, Stanford University.
- 2) Choi, H. C., Moin, P. and Kim J., 1994, "Active Turbulence Control for Drag Reduction in Wall-Bounded Flows", J. Fluid Mech., Vol. 262, pp.75-110.
- 3) McCormick, M. and Bhattacharyya, R., 1973, "Drag Reduction of a Submersible Bull by Electrolysis", Nav. Eng. J., Vol. 85, pp.11-16.
- 4) Madavan, N., Deutsch, S. and Merkle, C., 1984, "Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles", Phys. Fluids, Vol. 27, pp. 356-363.
- 5) Pal, S. Merkle, C. L. and Deutsch, S., 1988, "Bubbles Characteristics and Trajectories in a Microbubble Boundary layer", Phys. Fluids, Vol. 31, pp. 744-751.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) Hart, D. P., 2000, "PIV Error Correction", *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp.13-22.
 - 13) Westerweel, J., 1994, "Efficient Detection of Spurious Vectors in Particle Image Velocimetry Data", *Exp. Fluids*, Vol. 10000600, pp.236-247.
 - 14) Spalart, P. R., 1988, "Direct Numerical Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $Re=1410$ ", *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, pp.61-98.
 - 15) Nitcher, W., Thunker, R. and Haberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method", 4th Symp. on the Turbulent Shear Flows, pp. 261-276.
 - 16) Sano, M. and Hirayama, N., 1985, "Turbulent Boundary Layers with Injection and Suction through a Slit", *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 239, pp.807-814.
 - 17) Park, J. Y. and Choi, H. C., 1999, "Effects of Uniform Blowing or Suction from a Spanwise Slot on a Turbulent Boundary Layer Flow", *Phys. Fluids*, Vol. 11, No. 10, pp.3095-3105.
 - 18) Krogstad, P. and Kourakine, A., 2000, "Some Effects of Localized Injection on the Turbulence Structure in a Boundary Layer", *Phys. Fluids*, Vol. 12, pp.2990-2999.
 - 19) Park, S. H., Lee, I. W. and Sung, H. J., 2001, "Effect of Local Forcing on a Turbulent Boundary Layer", *Exp. Fluids*, Vol. 31, pp.384-393.
 - 20) Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2001, "Numerical Prediction of Locally Forced Turbulent Boundary Layer", *Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp.624-632.
 - 21) Park, Y. S., Park, S. H. and Sung, H. J., 2003, "Measurement of Local Forcing on a Turbulent Boundary Layer Using PIV", *Exp. Fluids*, Vol. 34, pp.697-707.
 - 22) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., 1993, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets", *J. Fluid Mech.*, Vol. 255, pp.503-539.
 - 23) Kim, K. Y. and Sung, H. J., 2003, "Effect of Periodic Blowing from Spanwise Slot on a Turbulent Boundary Layer", *AIAA*, Vol. 41, pp.1916-1924.
 - 24) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, "Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at low Reynolds Number", *J. Fluid Mech*, Vol. 177, pp.133-166.