대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 52, No. 4, pp. 356-363, August 2015
eISSN:2287-7355, http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.4.356

마찰저항 감소에 영향을 주는 난류 경계층 내 미세기포(microbubble)의 가시화 연구

백부근[1,2,†] · 임근태[1] · 김광수[1,2] · 김경열[1] · 김유철[1]
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소[1]
과학기술연합대학원대학교 선박해양플랜트공학[2]

Visualization of Microbubbles Affecting Drag Reduction in Turbulent Boundary Layer

Bu-Geun Paik[1,2,†] · Geun-Tae Yim[1] · Kwang-Soo Kim[1,2] · Kyoung-Youl Kim[1] · Yoo-Chul Kim[1]
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering[1]
Ship and Ocean Plant Engineering, University of Science and Technology(UST)[2]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Microbubbles moving in the turbulent boundary layer are visualized and investigated in the point of frictional drag reduction. The turbulent boundary layer is formed beneath the surface of the 2-D flat plate located in the tunnel test section. The microbubble generator produces mean bubble diameter of 30 - 50 μm. To capture the micro-bubbles passing through the tiny measurement area of 5.6 mm^2 to 200 mm^2, the shadowgraphy system is employed appropriately to illuminate bubbles. The velocity field of bubbles reveals that Reynolds stress is reduced in the boundary layer by microbubbles' activity. To understand the contribution of microbubbles to the drag reduction rate more, much smaller field-of-view is required to visualize the bubble behaviors and to find the 2-D void fraction in the inner boundary layer.

Keywords : Microbubble(미세기포), Turbulent boundary layer(난류 경계층), Skin friction(마찰 저항), PIV(particle image velocimetry:입자영상유속계), Shadowgraphy(그림자 기법)

1. 서 론

최근의 고유가 시대에 발맞추어 해양을 항행하는 운송체의 연료를 절감하기 위한 많은 노력들이 지속되고 있다. 해양 운송체의 연료 절감은 유체역학적인 저항을 감소시키는 연구와 밀접한 관련이 있어 마찰, 압력, 조파(wave making), 공기 저항 등의 저항을 감소시키는 구체적인 방법들에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 유가급등과 IMO(International Maritime Organization)의 온실가스(greenhouse gas) 배출에 대한 국제환경규제 등의 요인으로 인해 에너지 절감형 해양운송체의 설계와 기술에 대한 관심은 더욱 커져가고 있는 상황이다.

해양 운송체에서 나타나는 저항 중 마찰 저항은 유체의 점성(viscosity)에 의해 지배적으로 나타나기 때문에 점성 저항이라고도 불린다. 유체 유동의 속도가 증가함에 따라 마찰 저항도 증가하게 되는데 물체 표면에서 나타나는 마찰 저항을 감소시키기 위해 수동적(passive) 또는 능동적(active) 방법들이 이용되어 왔다. 특히 난류 구조나 경계층의 형상에 변화를 주거나 부가물들을 물체 표면에 부착하는 수동적 방법들은 물체 또는 물체 외부에서 추가적인 에너지 공급을 하지 않아도 되므로 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 능동적 방법들은 난류 구조나 경계층을 직접 간섭하여 마찰 저항을 감소시키는 메커니즘을 가지고 있어 그 효과가 작지 않다. 난류 경계층 내에 공기층 (Kim, et al., 2011)이나 기포들을 주입시켜 경계층의 특성을 바꾸거나 점성치를 변화시키는 방법들은 많이 진행되어 왔다. 특히, 기포를 활용한 마찰저항 감소법에는 분사되는 기포의 크기에 따라 일반기포 또는 미세기포를 활용하는 방법으로 나뉠 수 있다. 여기서 일반기포는 100 μm ~ 1 mm의 직경 분포를 가지며 미세기포는 100 μm 이하의 직경을 갖는 기포를 의미한다. 국내에서도 미세기포를 활용한 마찰 저항 감소법에 대한 연구가 진행된 바 있다 (Kim, et al., 2003). 하지만 당시 미세기포를 생성하고 주입하는 기법이 아직 성숙 지 않아서 사용된 기포는 약 200~600 μm 정도의 미소기포를 사용한 연구이며, 본격적으로 100 μm이하의 미

Received : 5 December 2014 | Revised : 27 July 2015 | Accepted : 7 August 2015
† Corresponding author : Bu-Geun Paik, ppaik@kriso.re.kr

세기포를 활용한 국내연구는 현재까지 없는 실정이다. 해외에서는 미세기포를 활용한 마찰저항 감소의 물리적 특성을 파악하기 위한 다양한 실험적 연구가 진행되어 왔다. 저항 감소를 확인하기 위해서는 마찰센서나 로드셀 등을 이용하여 힘 계측 방법을 이용할 수 있으나 저항 감소 또는 증가의 물리적 특성을 파악하는 것은 쉽지 않다. 특히 압력 또는 형상 저항을 제외한 대부분의 저항은 유체와 벽면 사이의 경계층 내 마찰에 기인하므로 벽면 위에 형성되는 경계층을 조사하는 실험적 기법이 필요하다. 본 연구에서는 마찰 저항 증감의 물리적 특성을 살펴 보기 위한 실험적 기법으로서 PIV와 그림자 기법을 이용하였다. PIV 기법은 유체 내에 추적입자를 균일하게 분포시키고 카메라와 레이저 조명을 동기(synchronization)시켜 추적입자의 변위를 계측하여 유동의 속도를 계측하는 방법인데 추적입자로서 TiO_2와 같은 고체뿐 만 아니라 기포를 사용하여 기포 유동장을 계측하기도 한다 (Paik, et al., 2009). 물론 LDV(laser Doppler velocimetry)를 이용하여 정밀하게 평판 위에 생성되는 경계층을 계측하여 (Paik, et al. 2013) 물리적 특성을 조사할 수도 있으나 기포가 경계층에 다량 존재할 경우 강한 산란광으로 인해 PM(photomultiplier) 튜브의 손상 가능성이 있으며 용수 속에 존재하고 있는 고체 추종입자로부터 발생하는 도플러 신호와 기포로부터 발생하는 도플러 신호를 분리 분석하지 않을 경우 계측 결과 해석이 난해할 수 있다. 그림자 기법의 경우 수조의 앞과 뒤에 카메라와 조명을 배치하여 수조 내 이동하는 기포의 크기 (Paik et al. 2013)나 거동을 조사하기 위해서 사용한다. 이 때 관측면의 크기는 수 mm에서 수십 cm에 이를 수 있는데 미세기포의 경우 관측면에 대한 상대적인 크기를 고려하여 가능한 작은 관측면에서 고속카메라 등을 이용하여 관찰해야 하고 노출 감소에 따라 조명의 세기를 조절해야 한다. Jacob, et al. (2010)은 난류경계층내의 국부 Kolmogrov scale에 필적할만한 직경을 가지는 100 μm이하의 미세기포를 평판유동의 경계층에 주입하고 PIV 등의 유동가시화 방법을 이용하여 마찰 저항 감소 현상을 연구 하였다. 이 연구에서는 난류경계층 내에서 미세기포의 군집특성과 거동특성을 계측하여 난류경계층의 유속 구배(gradient)를 변화시키고 난류응력을 저감시키는 물리적 특성을 파악하고자 하였다.

본 연구에서는 미세기포를 활용한 마찰 저항 저감 기법의 기초적인 연구자료를 확보하기 위한 목적으로, 본 연구소가 보유한 중형 캐비테이션 터널에서 100 μm이하의 미세기포를 생성시켜 2차원 평판의 경계층으로 분사하고 그 마찰 저항 감소 효과를 조사하였다. 또한, PIV 및 그림자 기법의 유동 가시화 기술을 이용하여 난류경계층 내에서 미세기포의 거동특성 및 군집특성을 분석하여 미세기포로 인한 난류 경계층 내 유동특성의 변화 및 난류응력변화 등의 마찰저항저감의 물리적 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 미세기포를 생성하기 위하여 가압융해방식(pressurization & dissolution type)을 사용하였는데 일반 가압펌프를 이용하여 흡입구(intake)에서 미세하게 공기를 흡입한 후 가압펌프의 높은 압력을 출수노즐에 구성된 압력 구멍(hole)을 통하여 여러 겹의 철망을 때려 흡입한 공기가 물속에 녹아 출수되도록 하는 방식이다. 가압융해방식의 미세기포 생성 장치(㈜ Raon Wellness)에서 토출되는 기포의 평균 크기는 40–50 μm이고 공극률(void fraction)은 약 5%이며 노즐 끝의 토출(discharge) 유량은 약 5.5 liter/min이다.

미세기포를 활용한 평판의 마찰저항 감소 시험은 본 연구소가 보유한 중형 캐비테이션 터널(Fig. 1)에서 수행되었다. 터널의 시험부 제원은 0.6^{W} x 0.6^{H} x 2.6^{L} m^3이다. 시험부에서 최대 유속은 12 m/s이며 시험부에서 정압을 10.1 kPa부터 202 kPa까지 가변할 수 있다.

Fig. 1 Medium-sized cavitation tunnel of KRISO

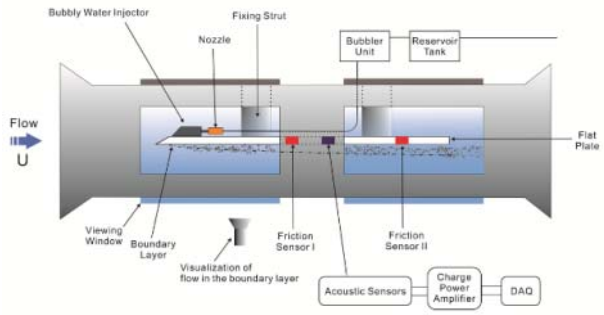


Fig. 2 Sketch of the experimental set-up

터널 관측부에 총 길이(L) 2 m의 평판을 설치하고 미세기포 생성장치 토출부를 평판 경계층으로 분사시킬 수 있는 실험 장치를 Fig. 2 및 3과 같이 배치하였다. 토출 노즐은 X/L = 0.23에 위치한다(X는 평판의 leading edge로부터 하류방향으로 떨어진 거리). 또한 토출 노즐의 분사각도는 15도 이하가 되도록 유지하였다. 평판에는 별도의 난류촉진장치를 부착하지 않았다. 유동가시화를 위하여 터널 관측부 중앙에 평판을 몰수시켜 스트럿으로 지지하였다. PIV 속도장 계측 및 그림자 기법으로 미세기포들을 가시화 한 위치는 X/L = 0.50이었다. 평판의 국부 마찰저항을 계측하기 위해서 2개의 마찰력 센서(원방포스텍)를 X/L = 0.53과 0.93에 부착하였다.

미세기포를 활용한 평판 마찰저항시험을 위해서 터널 시험부 내 유속을 1 m/s부터 3.5 m/s까지 0.5 m/s 간격으로 변화하였다. 이 때 노즐에서 토출되는 이상유동의 유량은 약 5.77 liter/min으로 고정하였다. 유속변화와 기포의 공급유량에 따른 마찰 저감량을 평판에 부착된 마찰력 센서를 통하여 계측하였다.

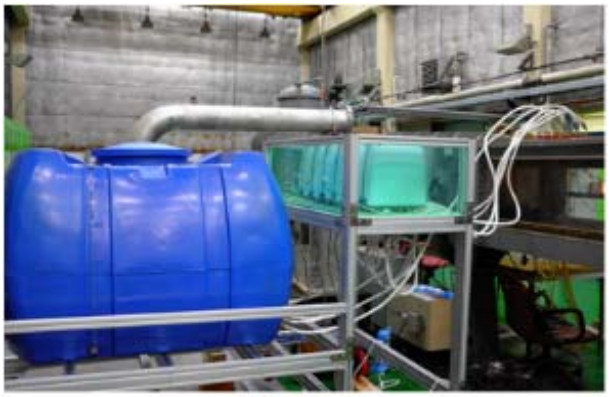


Fig. 3 Photo of experimental set-up

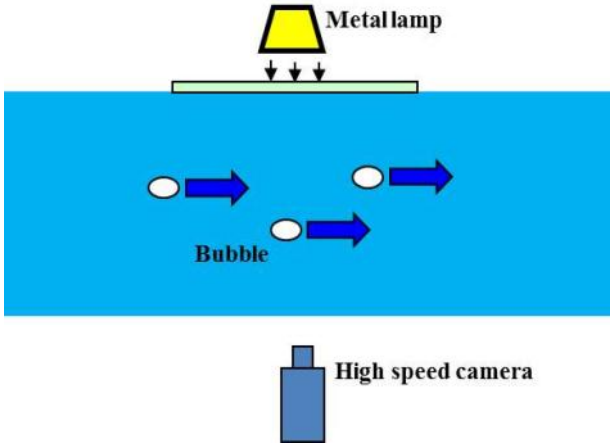


Fig. 4 Sketch of shadowgraphy method

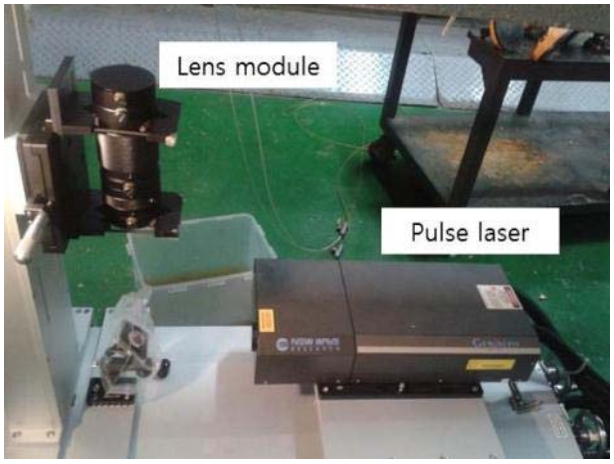


Fig. 5 Experimental set-up for PIV

미세기포들을 가시화하고 각 기포의 유속을 계측하기 위해서 Fig. 4와 같은 유동가시화 실험장치를 구성하였다. Cinematic PIV 시스템은 미세기포발생장치, 고속카메라, 렌즈, 메탈램프로 구성되어있다. Fig. 5에 고속카메라와 펄스 레이저, 렌즈 모듈을 나타내었다. 유동 가시화는 평판 바로 아래 난류경계층에 대해서 적용하였는데 기포가 없는 상태(w/o bubble, single phase)의 경계층과 기포가 있는 경우(w/ bubble, gas phase)의 경계층을 분리하여 실험하였다.

기포가 없는 경우에는 유체유동 추종 입자로서 TiO_2 입자(평균 직경 3 μm)를 사용하였으며 일반적인 PIV용 카메라를 이용하였다. 또한 200 mJ 펄스 레이저를 사용하였고 관측면의 크기는 14 x 14 mm^2이었다. 기포가 있을 경우에는 레이저광이 기포에 닿아 매우 강한 산란광을 발산시키므로 실험자의 시력 손상뿐 만 아니라 CCD 카메라의 셀(cell)을 손상시킬 가능성이 크다. 따라서 고에너지의 펄스 레이저를 사용할 수 없기 때문에 4W 연속 레이저나 메탈램프를 사용하였다. 연속광을 사용할 경우 PIV용 카메라와 레이저를 동기(synchronization)시키는 것이 불가능하기 때문에 고시간분해능(high time resolution)을 갖는 고속카메라를 사용하여 빠른 속도로 영상을 취득하였다. 이 때 선택된 관측면의 크기는 17 x 14 mm^2이었다. 고속카메라는 최대 초당 100만 프레임으로 촬영 가능하나 수조의 관측면 내 기포의 이동속도를 고려하여 초당 12000 프레임(frame), 800 x 600 pixels의 공간해상도로 촬영하였다.

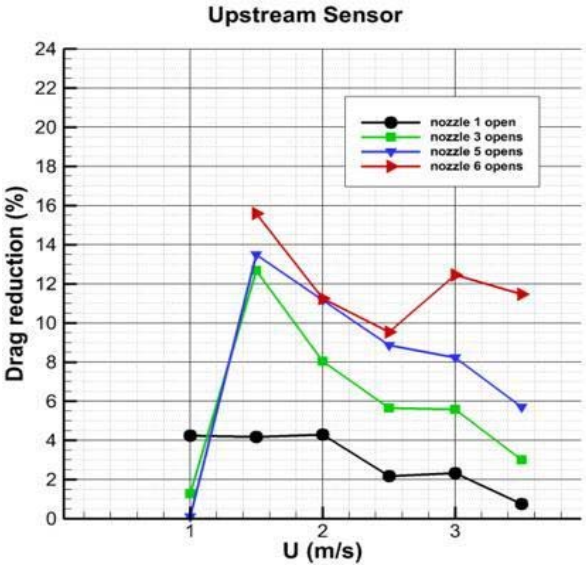
(a) 1.0 m/s

(b) 3.5 m/s

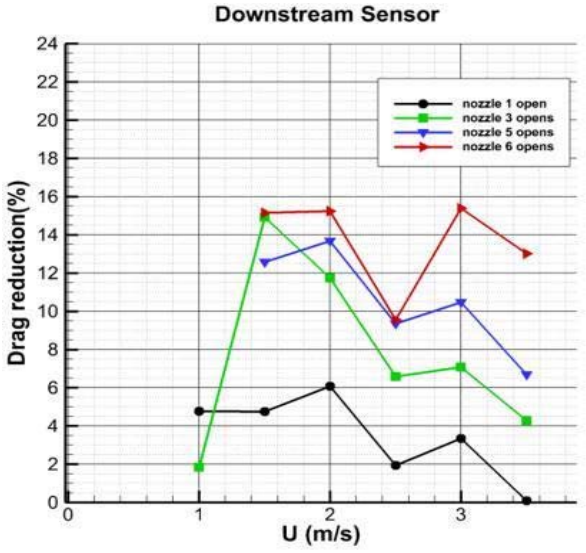
Fig. 6. High speed photos of bubbly flow

3. 결과 및 고찰

미세기포를 주입하지 않은 상태에서 X/L = 0.5 위치에서 경계층을 계측한 결과 $1.5 \times 10^6 < Re < 3.2 \times 10^6$ 이었고 $3500 < Re_\theta$ (모멘텀 두께 θ에 기초한 레이놀즈 수) < 6000, 1.28 < H (형상계수) < 1.42 로써 난류 경계층이 잘 발달되었음을 확인하였다. Fig. 6은 터널유속이 각각 1 m/s, 3.5 m/s 일 때 평판의 토출부에서 주입된 미세기포가 평판경계층 근처에서 거동하는 모습을 나타낸 사진이다. 유속변화에 따라 미세기포를 평판에 토출시켰을 때 고속카메라(SA5, Photron)를 활용하여 영상을 획득하였고 평판의 국부 마찰 저항을 계측하였다. 미세기포가 토출되지 않을 때의 평판의 마찰 저항 대비 미세기포로 인해 저감된 마찰 저항에 대해 비교한 그림을 Fig. 7에 나타내었다.



(a) Upstream sensor(X/L=0.53)



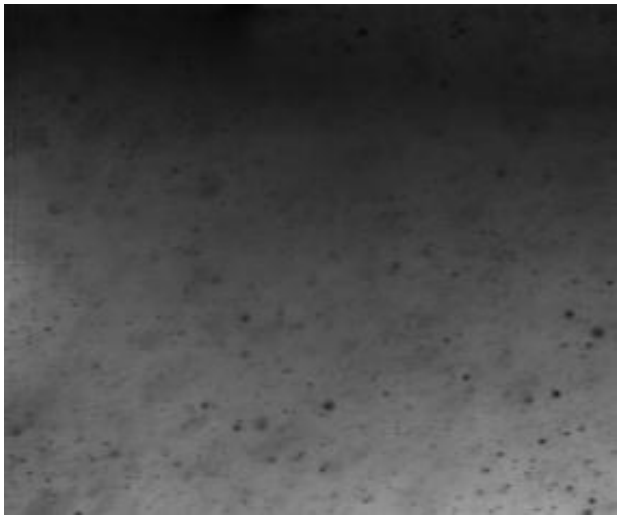
(b) Downstream sensor(X/L=0.93)

Fig. 7 Comparison of drag reduction ratio with micro-bubbles

결과에 의하면 개방된 기포 토출 노즐 수가 증가하면 미세기포의 토출 유량이 많아져 마찰 저항 저감율이 높아짐을 확인할 수 있다. 또한 유속이 빨라지면 그 저감율은 점차 낮아지는 경향을 보이며 유속이 1.5 m/s일 때 평판 마찰 저항 저감율은 최대 약 16%에 도달함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 평판의 상류부와 하류부 모두 유사하게 나타나고 있다. 평판 경계층의 두께는 유속이 빨라짐에 따라 얇아지게 되어 마찰력 저감에 기여하는 미세기포의 양이 감소하는 것으로 판단된다.

결국 미세기포에 의한 마찰 저항 감소 원인을 살펴 보기 위해서는 미세기포가 경계층 내에서 어떠한 거동을 하고 어떠한 군집분포를 갖는지 조사하는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 평판의 경계층 내에서 거동하는 미세기포들의 물리적 특성을 살펴 보기 위하여 유동가시화 기법을 이용하였다.

(a) w/o bubbles

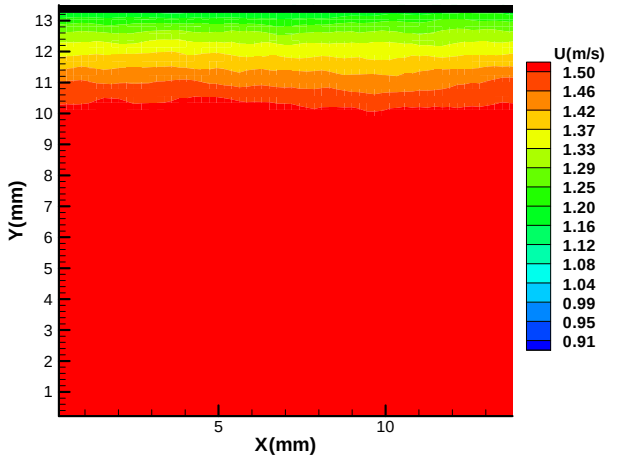


(b) w/ bubbles

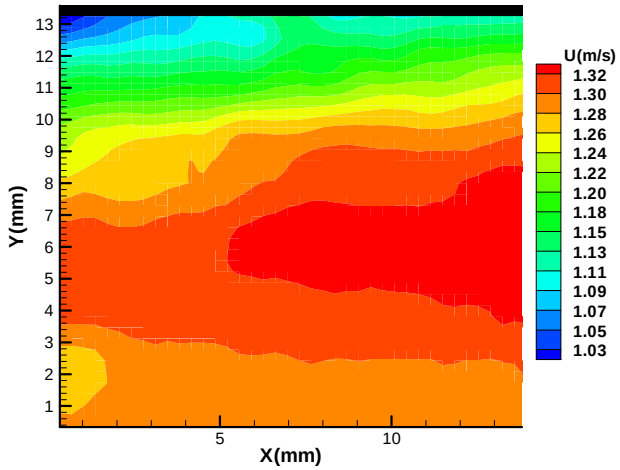
Fig. 8 Particle images for PIV processing

Fig. 8은 기포 유무에 따라 상기 시스템을 이용하여 취득한 입

자영상이다. Fig. 8(a)는 기포가 없을 때 고체 입자들이 레이저 평면광에 의해 산란되어 밝은 점으로 나타난 영상이며 Fig. 8(b)는 발생된 기포들을 레이저가 아닌 백색광으로 조사하여 얻어진 그림자 영상인데 검정색으로 보이는 작은 입자들이 기포들이다. 취득된 입자영상들을 이용하여 PIV 속도장을 얻을 수 있으며 그 결과들을 Fig. 9에 표시하였다.



(a) w/o bubbles



(b) w/ bubbles

Fig. 9 Typical velocity fields of boundary layer flow w/ and w/o bubbles

Fig. 9의 그림에서 입자 속도는 적색으로 갈수록 속도가 빠르며 푸른색으로 갈수록 속도가 낮아진다. 고체 입자의 경우 top에 위치한 wall의 영향으로 속도 영역이 x축에 따라 균일하게 형성되고 있으나 기포 입자의 경우 기포들의 이동 속도를 계측한 것이므로 y 방향을 따라 위 아래로 거동하는 기포가 많아 속도 층이 균일하지 않으며 높은 속도층이 고체 입자의 경우와 다르게 형성되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 경계층 내 기포가 없는 유체 유동의 속도 profile을 표시한 것인데 높이 방향 거리 Y와 유속 U를 마찰속도(U_τ)와 동점성 계수(ν)로 무차원화 하여 Y^+와 U^+로 표시하였다.

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} \qquad (1)$$
$$Y^+ = \frac{YU_\tau}{\nu}$$

계측된 속도를 보면 관측영역이 점성저층(viscous sublayer) 약간과 완충층(buffer layer), 내층(log-law region)에 걸쳐서 설정되었음을 볼 수 있다. 다소 아쉬운 것은 대부분의 마찰 저항 감소 현상이 점성저층과 완충층에서 이루어지는 바 관측면의 크기가 다소 커서 관심 영역을 제대로 조사하지 못한 것이다.

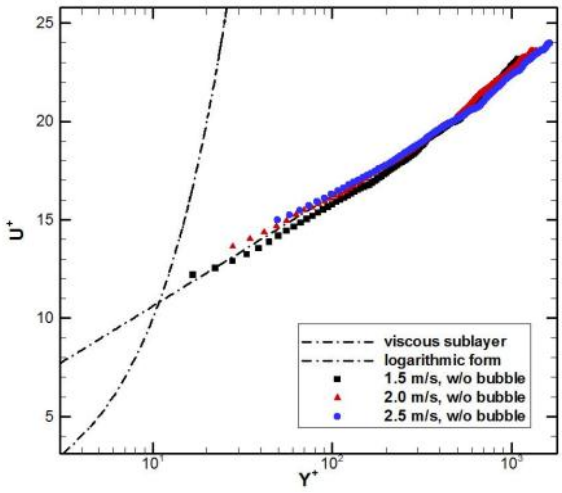


Fig. 10 Velocity profiles of fluid flow in boundary layer (X/L = 0.5)

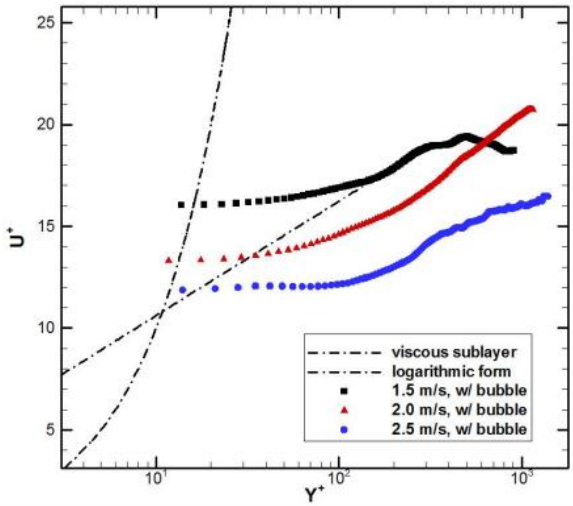


Fig. 11 Velocity profiles of bubble in boundary layer (X/L = 0.5)

Fig. 11은 기포만을 가시화한 경우로서 점성저층으로 접근함에 따라 속도 분포가 Fig. 10의 그것과 다소 다름을 확인할 수 있다. 기포들만의 속도분포를 무차원화하여 그래프로 나타낼 때, 기포들만의 마찰속도(U_τ)를 정의하기 힘들다. 미세기포와 액상

(water phase)이 함께 존재할 때의 국부마찰 저항을 기준으로 마찰속도(U_τ)를 정의하여 무차원화해서 나타내면, Fig. 10에 나타낸 기포가 없는 경우의 내층의 그래프에 겹치지 못하고 유속에 따라 평행하게 옮겨져 나타난다. 다만 내층(log-law region)에서의 기울기는 기포가 없는 유체의 경우와 거의 같지만 완충층(buffer layer)과 점성저층(viscous sublayer)의 영역에서는 미세기포의 무차원화 속도분포 기울기가 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이 결과를 볼 때, 미세기포들은 내층(log-law region)에서는 기포가 없는 유동장과 동일한 거동을 하지만 벽면에 더 가까워지는 완충층과 점성저층에서 속도분포의 변화가 나타나고 있음을 보이는 결과이며, 평판 마찰저항저감은 완충층과 점성저층에 존재하는 미세기포들의 거동특성에 관련이 있다는 사실을 나타내고 있다.

본 가시화 연구의 주 목적은 미세 기포에 의해 마찰 저항이 감소하는 원인을 분석하고자 함에 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 난류 경계층의 특성에 대해서 살펴 보아야 한다. 난류 경계층 내에는 일관된(coherent) 난류 구조가 존재하게 되는데 난류 구조 내 보텍스(vortex)의 거동에 의해서 난류 이벤트(event)가 다양하게 출현한다. 난류변동속도 성분 u'은 u'=u-u(mean)을 의미하며 난류 이벤트는 sweep, ejection, inward/outward interaction 등의 4가지로 분류되는데 u'과 v'의 곱에 의해 나타나는 값들을 이용하여 해석하는 방형구 해석(quadrant analysis)을 통해 난류의 소산과 생성에 대해서 예측할 수 있다 (Kim, et al., 1987).

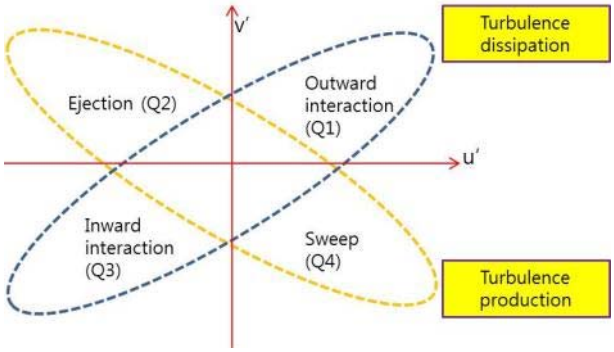


Fig. 12 Quadrant analysis for turbulence events

Fig. 12에서 보는 바와 같이 1상한(Q1)과 3상한(Q3)은 난류가 소산(dissipation)되는 영역으로서 u'과 v'의 곱이 양(positive)의 값을 취한다. 그러나 2, 4 상한의 경우 ejection과 sweep이 일어나는 구간으로서 u'과 v'의 곱이 음의 값을 취하며 난류가 생성(production)된다. 결국 난류가 생성되면 난류경계층에 의한 마찰항력이 증가하게 되므로 ejection과 sweep 이벤트가 얼마나 강하게 발생하는지 조사할 필요가 있다. 사실 u' > 0, v' < 0 인 영역에서 sweep 이벤트가 나타나며 주된 마찰항력 증가가 발생하게 되므로 이 영역을 자세히 파악해야 하나 본 연구에서는 u'v' < 0인 영역에 대해서 초점을 맞추어 조사하였다. u'과 v'의 곱은 일반적으로 레이놀즈 스트레스(Reynolds stress)라고 불리는 항으로 나타낼 수 있고 이 레이놀즈 스트레스 값의 경향을 살펴보면 미세기포에 의한 영향을 조사할 수 있게 된다. Fig. 13을 보면 기포가 없을 경우 완충층에서 레이놀즈 스트레스 값의 크기가 크고 음의 값을 띄고 있어 난류 생성이 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 기포의 경우 레이놀즈 스트레스 값의 크기가 작고 오히려 2 m/s에서는 양의 값을 띄고 있어 난류의 생성이 많이 감소되었음을 잘 알 수 있다.

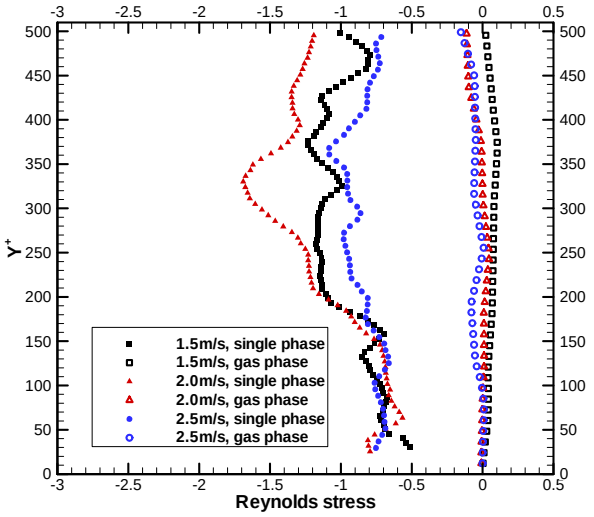


Fig. 13 Reynolds stress distribution in single and gas phases

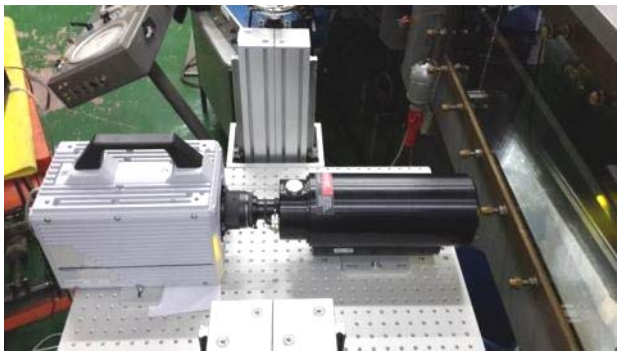
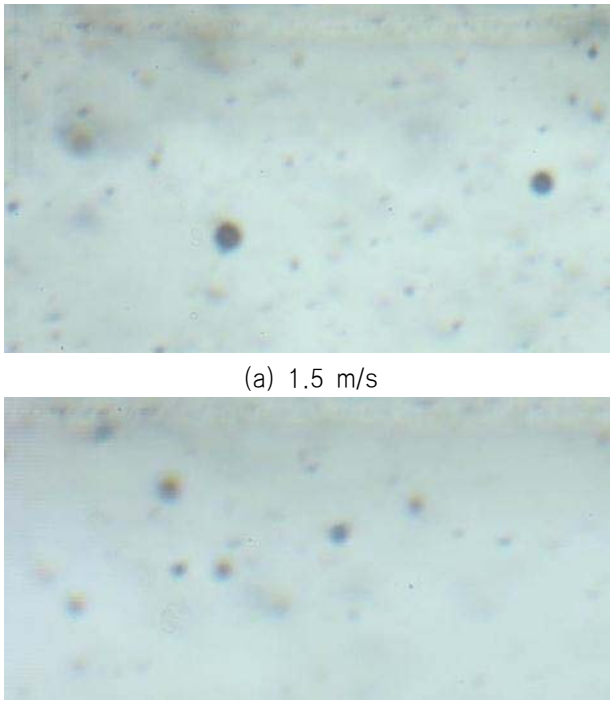


Fig. 14 Long distance microscope and high speed camera

Table 1 Experimental condition for bubble visualization

Flow speed (m/s)	Field of view (mm^2)	Spatial resolution (pixels)	FPS (frame/.sec.)
1.0	3.12 x 1.79	640 x 368	20000
1.5	3.12 x 1.79	640 x 368	20000
2.0	2.50 x 1.25	512 x 256	30000
2.5	2.50 x 1.25	512 x 256	30000
3.0	1.56 x 1.25	320 x 256	40000

이상의 결과는 미세기포 크기나 경계층의 두께에 비해 비교적 큰 관찰영역에 대해 계측한 속도장을 해석한 것이다. 즉, 큰 관찰영역에서 직경이 70 μm 보다 작은 기포에 대해서는 영상으로 취득되지 못했을 가능성이 크다. 경계층, 특히 완충층 내 영역에서 미세기포의 군집특성 및 유속에 따른 공극률이 어떻게 나타나는 가를 자세히 조사하기 위해서는 원거리 현미경(long distance microscope, 단텍 다이너믹스사) 등을 이용한 세밀한 유동가시화 연구가 필요하다.



(a) 1.5 m/s

(b) 2.5 m/s

Fig. 15 Typical shadow images captured in the boundary layer

실험용으로 많이 사용되는 macro 렌즈는 초점 길이가 200 mm 이하이며 관측면의 크기도 10 mm 이하로 낮추는 것이 어렵기 때문에 비교적 먼 거리(30 cm)에서도 활용이 가능한 현미경(microscope)이 필요하다. 기포의 직경 분포를 정확히 해석하는 것 외에도 난류경계층의 완충층 이하의 영역을 가시화하기 위해서는 최소 2 mm 이하의 관측면을 관찰해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 14와 같은 원거리현미경(long distance microscope)을 구비하여 미세 기포를 가시화하고자 하였다. 이 원거리현미경의 초점거리(focusing distance)는 38 cm이고 최소 관측면 크기는 2 mm이었다. 원거리현미경과 고속카메라를 동시에 미세 이동 가능하도록 높이방향 1축 이송시스템(traverse)과 광학테이블 위에 설치하였다.

2 mm 정도의 매우 작은 관측 면적을 상대적으로 빠르게 지나가는 기포들을 가시화하기 위해서는 강한 광원으로 해당 영역을 조명해야 한다. 광량 및 광 세기가 큰 metal 램프의 백색광을 관측면의 후면에서 조사하여 미세 기포의 그림자 영상을 취득하였다. 중형캐비테이션 터널의 시험부를 흐르는 유동의 유속과 고속카메라의 시간분해능 및 공간해상도(spatial resolution)를 고려하여 Table 1에 나타낸 시험조건으로 평판의 경계층 내를 이동하는 미세 기포들을 가시화하고자 하였다. 유속이 빨라질수록 이동하는 기포들을 잔상 없이 포착하기 위해서는 초당 프레임 수를 높여야 하고 고속카메라의 정해진 메모리에 따라 공간해상도가 감소하게 된다. 이 때 1~1.5 m/s 유속에서 가장 큰 3.12 x 1.79 mm의 관측면 크기를 얻게 된다. Table 1의 가시화 조건에 따라 취득한 전형적인 기포 영상을 Fig. 15에 나타내었다. 영상 상부의 평행한 경계는 평판의 아크릴 창 바닥면을 의미한다. 원거리현미경의 초점 깊이(focal depth)가 매우 얇고 많은 수의 렌즈가 배열되어 있는 고유의 광학계 특성으로 인해 macro 렌즈로 취득한 기포영상에 비해 다소 화질이 떨어지기는 하였으나 shadow processing 소프트웨어(단텍 다이너믹스사)를 통해 초점이 잘 맞은 기포들을 분석하는 것은 가능하였다. 각 기포의 추출 및 추적을 위해서는 기포를 인지하고 기포의 경계를 결정하는 수치적 기법이 필요하다. 본 연구에서는 threshold level method, edge height/edge slope/area validation methods 등을 적절히 이용하여 기포 영상을 해석하였다. Shadow processing을 통해 기포들을 추출한 후 기포의 크기(직경) 정보를 얻을 수 있다. 각 기포의 윤곽(boundary)은 정확한 원 모양이 아니기 때문에 같은 면적의 원모양으로 전환 후 등가직경(equivalent diameter) 정보를 취하게 된다.

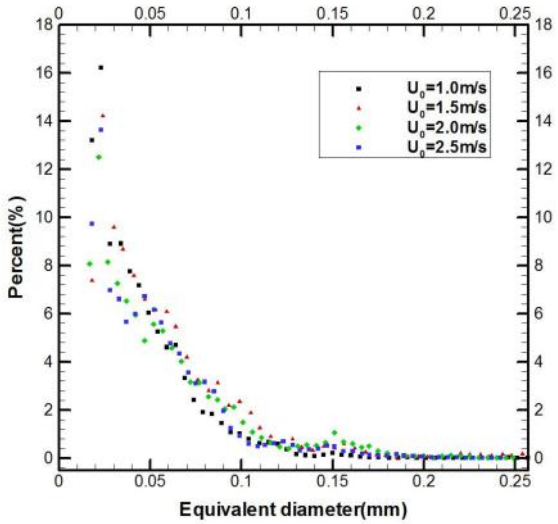


Fig. 16 Equivalent diameter of bubbles

Fig. 16은 500장의 기포 영상으로부터 추출한 기포들의 등가직경을 보인다. 등가직경 15 – 30 μm를 갖는 기포들은 약 28.6%, 30 – 50 μm은 24.6%, 50 – 100 μm은 34.8% 정도를 차지한다. 기포들의 등가직경을 얻으면 면적을 구할 수 있고 2차원 공극률(void fraction)을 아래의 식에 따라 계산 할 수 있다.

$$Void\ fraction\ \beta = A_G/(A_G + A_L) \quad (2)$$

여기서 A_G는 해당 영상에서 기포가 차지하는 면적이고 A_L은 액상이 차지하는 면적을 의미한다.

Fig. 17에 계산된 공극률을 나타내었는데 각 유속에서 추출된 기포의 면적이 shadow processing 방법과 기포들의 거동에 따라 조금씩 달라지므로 각 유속에 대해서 공극률 error bar를 같이 표시하였다. 관찰된 가시화 영역에서 공극률 결과를 살펴 보면 1.5 m/s 유속의 경우 최대 약 3.4%의 공극률이 나타났으며 마찰력을 계측하여 얻은 마찰저항 감소율 결과와 유사하게 공극률이 발생한 것을 잘 알 수 있다. 결국, 2 ~ 4% 정도의 공극률이 경계층 내에 발생해야 충분한 마찰저항 감소 효과가 나타남을 알 수 있다.

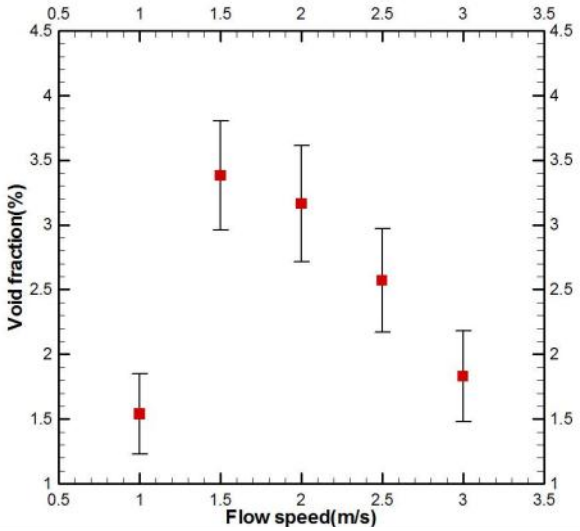


Fig. 17 2-dimensional void fraction with error bars

4. 결 론

본 연구에서는 기포 발생 장치를 이용하여 미세기포를 생성시켰는데 50 μm 크기 이하의 미세기포가 약 53% 정도를 차지하였다. 2차원 평판에서 나타나는 난류경계층 내로 생성된 미세기포들을 성공적으로 유입시켰으며 평판에 매입 설치된 마찰 센서(friction sensor)를 이용하여 10 – 16%의 저항 감소 효과를 계측하였다.

난류 경계층 내 미세기포 거동에 의해 레이놀즈 응력의(Reynolds stress) 크기가 감소하여 난류생성을 저감시켰으며 국소 공극률(local void fraction)은 유속에 따라 다르게 나타났다. 최종적으로 2.5 ~ 3.6%의 공극률이 마찰저항을 감소시키는 데 기여하였음을 알게 되었다.

후 기

본 연구는 본 연구는 PES1810 과제 및 PNS2420, PNS2430 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

References

Jacob, B. Olivieri, A. Campana, E.F. & Piva, R., 2010. Drag Reduction by Microbubbles in a Turbulent Boundary Layer. *Physics of Fluids*, 22, pp.115104-11.

Kim, D.S. Kim, H.T. & Kim, W.J., 2003. Experimental Study of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow with Microbubble Injection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(3), pp.1-8.

Kim, J. Moin, P. & Moser R., 1987. Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds number. *Journal of Fluids Mechanics*, 177, pp.133-166.

Kim, J.H. Oh, J.Y. Seo, D.W. & Lee, S.H., 2011. A Study on the Characteristics of an Air Cavity Attached under a Flat Plate. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(5), pp.396-403.

Paik, B.G. Kim, K.Y. & Ahn, J.W., 2009. Measurements of High Velocity Gradient Flow using Bubble Tracers in a Cavitation Tunnel. *Journal of Fluids Engineering*, 131, pp.091301.

Paik, B.G. Kim, K.Y. Cho, S.R. Ahn, J.W. Cho, S.R. Kim, K.R. & Chung, Y.U., 2013. Study on the Drag Performance of the Flat Plates Treated by Antifouling Paints. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.399-406.

백 부 근

임 근 태

김 광 수

김 경 열

김 유 철