

평판 위 흐름 Defect Law 영역의 난류 특성 연구

서성부* · 박일룡* · 정광효** · 임정관** · 김광수*** · 김진***

*동의대학교 조선해양공학과

**부산대학교 조선해양공학과

***한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트 연구소 미래선박연구부

Investigation of Turbulence Characteristics of Defect Law Region over Flat plate

Sung-Bu Suh*, Il-Ryong Park*, Kwang-Hyo Jung**, Jung-Gwan Lim**, Kwang-Soo Kim*** and Jin Kim***

*Naval Architecture Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

**Naval Architecture Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

***Advanced Ship Research Division, KRISO, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Turbulent boundary layer 난류 경계층, Particle image velocimetry 입자영상유속계, Reynolds stress 레이놀즈응력, Taylor micro length scale 테일러 미시 길이척도, Kolmogorov length scale 콜모고로프 길이 척도

ABSTRACT: To investigate the turbulence characteristics within the boundary layer over a flat plate, an experimental study was performed using a PIV technique in a circular water channel. For two water velocities, 0.92 and 1.99 m/s, the water velocity profiles were taken and analyzed to determine turbulent characteristics such as the Reynolds stress, Taylor micro-length scale, and Kolmogorov length scale within the defect law region of the boundary layer. These analysis methods may be applied to research on the friction drag reduction technology using micro-bubbles or an air sheet over the surface of a ship's hull, because the physical reason for the friction drag reduction could be found by understanding the variation of the turbulence characteristics and structures in the boundary layer.

1. 서 론

최근 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서 제안한 EEDI(Energy efficiency design index)에 의해 해양 운송수단에 대한 환경규제가 엄격해 지고 있다. 대표적인 해양 운송수단인 선박의 연비 효율을 높이기 위하여 많은 방법들이 제안되고 연구가 수행되고 있다. 현재까지 제안된 여러 방법들 중 미세기포(Micro bubble) 및 공기층(Air sheet)을 활용하여 선박과 유체에 기인하는 마찰저항 저감 기법이 활발하게 적용되고, 이에 대한 연구가 활발하다. 미세기포를 활용한 마찰저항 저감 기법을 실선에 적용하여 7.38%의 항력이 감소됨을 Nagamatsu et al.(2002)이 발표하였고, Kim et al.(2003)은 다공판에 미세기포를 주입함으로써 공기 주입량에 따른 마찰저항감

소 효과를 확인하였다. 또한 Latorre et al.(2003)은 SES catamaran의 표면에 미세기포를 주입하여 5~8%의 저항저감효과를 모형시험을 통하여 검증하였다. Kwon et al.(2004)는 2차원 평면 PIV(Particle image velocimetry) 측정기법과 3차원 스테레오 PIV기법을 적용하여 난류 경계층의 3차원적인 구조를 확인하였고, Jacob et al.(2010)은 미세기포의 공극비(Void ratio)에 따른 평판 마찰저항 감소 현상을 연구하여 국부 벽 응력(Local wall stress)이 최고 25%감소함과, 미세기포와 물이 혼합된 다상유체 유동장을 PIV기법을 활용하여 난류 구조의 변화를 보고하였다.

Park et al.(2010)은 평판에 수직 날을 부착하여 횡방향 운동량 교환의 역제가 난류량 감소와 마찰저항 감소(9.6%)의 원인이 됨을 보고하였다. An and Ahn(2011)은 아크릴 판 표면 홈(Groov)에

Received 5 March 2014, revised 9 July 2014, accepted 19 August 2014

Corresponding author Kwang-Hyo Jung: +82-51-510-2343, kjung@pusan.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

Air cavity를 생성시켰을 때 19% 저항저감효과를 실험적으로 확인하였다. 또한 Paik et al.(2012)은 평판표면에 가공된 딥플에 의해 난류 경계층 내 주 유동방향 항력 감소의 원인이 됨을 발표하였다. 또한, Paik et al.(2013)은 LDV(laser doppler velocimeter)와 PIV기법을 이용하여 평판 위 흐름의 경계층 유동장을 계측하고, POD(proper orthogonal decomposition)기법을 활용하여 경계층 난류 유동장의 구조를 해석하였다.

본 연구는 미세기포 등을 활용한 마찰저항 감소의 물리적 원인 규명을 위한 기초 실험 연구로 평판 위 흐름의 경계층 내부 유동장의 레이놀즈응력(Reynolds stress), 테일러 미시 길이척도(Taylor micro length scale), 콜모고로프 길이척도(Kolmogorov length scale)를 분석하였다. 이 결과는 마찰저항 저감을 위해 적용되는 미세기포 등에 의한 경계층 내부 난류 특성변화 중 정량적으로 비교될 수 있는 특성이다. 미세기포 적용에 의한 마찰저항 저감 시 레이놀즈응력 변화 연구는 Jacob et al.(2010)에 의해 보고된 바 있으나, 테일러 미시 길이척도와 콜모고로프 길이척도 변화에 대한 연구 보고는 미흡하여 향후 미세기포를 이용한 마찰저항 저감 연구에 적용될 수 있는 기초 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 PIV기법을 활용하여 평판 위 흐름의 경계층 내부 유동장 계측과 난류 특성을 해석하기 위한 기법을 소개하고, 2개 유속(0.92m/s, 1.99m/s)에 대한 레이놀즈응력, 테일러 미시 길이척도, 콜모고로프 길이척도들의 수직 분포 결과를 제시한다.

2. 실험 방법 및 분석

실험을 수행한 부산대학교 고속회류수조(Fig. 1)는 관측구(길이 2m × 높이 0.2m × 폭 0.2m)에서 최대속도 25m/s의 균일류를 구현할 수 있다. 고속 회류수조의 상부 관측창에 마찰저항 계측을 위한 길이 0.1m, 폭 0.05m, 두께 0.0078m의 평판에 저항동력계를 설치하여 평판 마찰저항 계측과 함께 PIV기법을 적용하여 경계층 내부의 유동장을 계측하였다.

고속회류수조 관측부 윗면에 설치된 평면마찰저항 계측 시편 위의 경계층 내부의 수직유속분포를 측정하기 위해 가로 0.056m, 세로 0.076m의 유속측정구간(FOV, field of view)에서 PIV기법을 활용하였다. PIV기법은 Hot-wire 기법 등과 달리 유동의 흐름을 교란시키지 않고, 고해상도 유동 속도장을 계측할 수 있으며, 속도장의 공간적 상관 해석을 통해 테일러 미시길이 척도, 난류 소산율에 근거한 콜모고로프 길이 척도 등의 공간

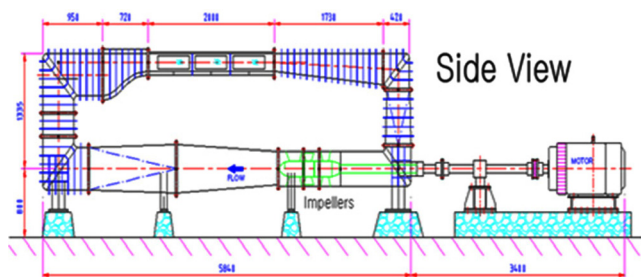


Fig. 1 High speed circular water channel

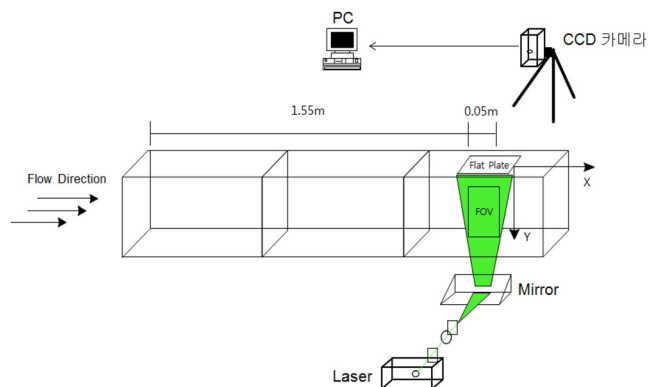


Fig. 2 PIV Setup in Test section

적 변화 및 분포를 도출할 수 있기 때문에 본 실험에 적용되었다. PIV시스템은 다이오드 연속레이저, 초고속 디지털 CCD(charge-coupled device)카메라, 광학렌즈시스템으로 구성되었다. 다이오드 연속레이저의 최대출력은 8Watt, 파장(Wave length)은 532nm이고, 초고속 디지털 CCD카메라는 2352×1728pixels의 해상도와 Max. Hz는 7000f/s, Pixel size는 7 μ m, 해상도는 8bit의 분해능을 가지고 있다. Sigma사의 105mm 렌즈를 부착하여 f/2.8의 조리개 값에서 입자영상을 획득하였다. 레이저는 두 개의 Cylindrical plano concave lens로 구성된 광학렌즈시스템을 통과하여 만들어진 약 1mm두께의 레이저 면(Laser light sheet)이 유속측정구간에 형성되도록 하였다(Fig. 2). PIV실험에서 이용된 입자는 비중(Specific gravity) 1.02, 크기(d50) 57 μ m인 Vestosint 2157을 이용하였다.

속도장 계산을 위하여 초고속 CCD카메라로 이미지 간의 시간 간격(Δt)은 1ms로 설정하여 연속으로 이미지를 획득하여, 이중화상상관기법(Double-frame/single-pulsed method)을 이용하였다. 조사구간(Interrogation window)은 64×64pixels이고 주변 조사구간과 50%의 화상중복(Overlap)을 하여 속도장을 계산하여, 주변 속도벡터간의 간격은 1.034mm이다.

PIV를 이용하여 얻어진 속도장의 불확실성은 Particle image diameter(d_p)와 pixel 크기(d_{pix}) 비의 함수이다(Raffel et al., 1998). 이 실험에서는 $d_p / d_{pix} \gg 1.0$ 이고, 이에 해당하는 Bias error는 약 0.1pixel정도이다. 이는 1.6mm/s의 유체 속도에 해당하고, 평균유속의 2%미만으로 평가된다.

평판 위 경계층 내부 유동장 실험 조건인 평균유속 0.92m/s와 1.99m/s에서 회류수조의 경계층 외부의 평균유속대비 난류강도는 각각 x방향 0.7%, 0.11%, y방향 0.019%, 0.023%로 약 1% 정도의 난류강도 특성을 지닌 폐쇄형 회류수조에서 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 해석

실험을 수행한 두개의 유속(0.92m/s, 1.99m/s)에서 저항 평판에 작용하는 마찰항력을 계측하고, 식(1)을 적용한 마찰항력계수(C_f)를 Hughes Line(Lewis, 1988)의 경험식 식 (2)와 Clauser(1954)의 선도법(Chart method) 식 (3), 식 (4)를 이용하여 추정한 마찰항력

Table 1 Comparison of experiment and Hughes and Clauser for skin-friction coefficient

U_0		0.92 m/s			1.99 m/s		
CASE	Experiment	Hughes	Clauser	Experiment	Hughes	Clauser	
C_F	0.00384	0.00399	0.004	0.00319	0.003	0.003	

계수(C_F)의 결과와 함께 비교하였다(Table 1). 레이놀즈수(Re_x)는 평균 유속 0.92m/s에서 1.47×10^6 , 1.99m/s에서 3.18×10^6 이며, U_0 은 유입량 평균 유속, S 는 평판의 침수표면적이다.

$$C_F = \frac{2F}{\rho U_0 S} \quad (1)$$

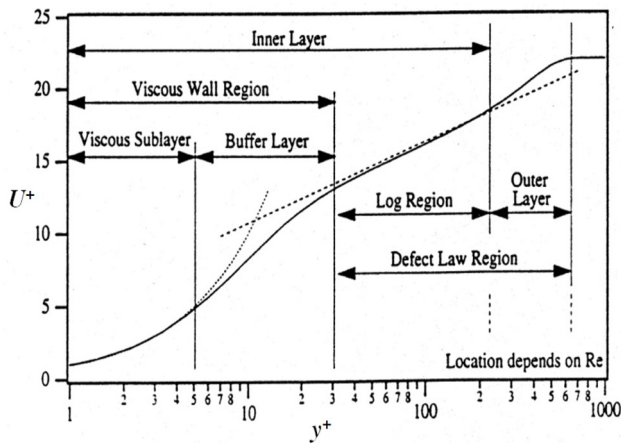
$$C_F = \frac{0.067}{(\log_{10}^{Re_x} - 2)^2} \quad (2)$$

$$U^+ = \frac{u}{U_c} \quad (3)$$

$$y^+ = \frac{y U_0}{\nu} \quad (4)$$

저항동력계로 측정된 마찰항력계수(C_F)를 이론값들과 비교해 볼 때 다소 차이는 있지만, 전반적으로 측정이 잘 되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 3(Crimaldi, 1998)과 같이 평판 위 흐름의 난류경계층은 크게 내부층(Inner layer), 외부층(Outer layer)으로 이루어져 있다. 내부층은 점성응력이 크게 작용하는 점성벽면범위(Viscous wall region)와 난류가 발달한 난류유동(Fully developed turbulent)이 발생하는 로그범위(Log region)로 이루어져 있고, 점성벽면범위는 점성저층(Viscous sublayer)과 완충층(Buffer layer)으로 분류된다. 점성저층은 점성응력이 지배적이고, 상대적으로 레이놀즈응력은 무시된다. 완충층은 레이놀즈응력과 점성응력(Viscous shear stress)이 같아지며, 레이놀즈응력이 점점 증가하며 점성응력은 상대적으로 감소된다.

**Fig. 3** Boundary layer structure

본 실험에서 Fig. 2와 같이 평판은 테스트섹션 도입부로부터 X방향으로 1.55m 지점에 설치되어 있으며, 1.6m 지점에 위치한 평판 중심에서 0.92m/s와 1.99m/s 두 유속에 대한 유속장을 PIV로 측정하여 250개 순간 유속장으로 부터 계산된 평균유속(U)의 y방향 속도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. y는 평판으로부터의 수직 거리이고, δ 는 경계층 두께이다. 평균유속의 수직분포로부터 배제두께(Displacement thickness) 식 (5)와 운동량 두께(Momentum thickness) 식 (6)을 계산하였고, 식 (7)을 이용하여 난류 경계층의 형상계수(H)를 결정하였다(Table 2). Pope, (2000)에서 Blasius profile은 $H \approx 2.6$, Klebanoff boundary layer는 $H \approx 1.3$, Schlichting and Gersten(2000)에서는 층류흐름에서는 $H \approx 2.6$ 에서 레이놀즈수의 증가와 함께 천이영역이후로 형상계수(H)가 1.0~1.4의 범위에 포함될 수 있다고 제시하고 있다. 본 연구에서 형상계수(H)는 1.24와 1.37이며 난류 경계층이 잘 형성되었음을 알 수 있다. 운동량 두께 레이놀즈수(Momentum thickness Reynolds number)는 각각 1840과 5373이고, Clauser(1954)의 선도법을 이용하여 측정된 마찰항력계수(C_F)를 식 (9)에 대입하여 마찰속도(u_τ)를 계산하였다. 평균유속의 난류 경계층 영역별 분포를 보고자 실험값은 식 (12)와 식 (13)을 적용하였으며, 이를 벽법칙(Law of the wall) 식 (10)과 로그법칙(Log law) 식 (11)과 함께 비교하였다(Fig. 5). 식 (11)에서 κ 는 0.41을 취하며 Von-Karman 상수라 하고, 상수 c 는 4.9를 취하였다. 본 실험은 Fig. 5에 의해 점성벽 영역을 포함하지 않고, 결손법칙영역(Defect law region)에서 유속 계측을 수행하였음을 알 수 있다.

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) dy \quad (5)$$

$$\theta = \int_0^\infty \frac{U}{U_0} \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) dy \quad (6)$$

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (7)$$

$$Re_\theta = \frac{U\theta}{\nu} \quad (8)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{C_F}{2}} \times U_0 \quad (9)$$

$$U^+ = y^+ \quad (10)$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + c \quad (11)$$

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (12)$$

$$y^+ = \frac{y}{\delta_\nu} \quad (13)$$

$$\delta_\nu = \frac{\nu}{u_\tau} \quad (14)$$

- U_0 : 유입류 평균유속
- δ^* : 배제 두께
- θ : 운동량 두께
- H : 형상계수
- Re_θ : 운동량 두께 레이놀즈수
- u_τ : 마찰속도
- C_F : 마찰항력계수
- δ_ν : 점성길이척도
- κ : Von-karman 상수

평균유속 분포는 전반적으로 로그법칙의 결과와 일치하지만, 유속 0.92m/s 조건의 $y^+ = 42.48$ 에서 평균유속이 다소 빠르고, 유속 1.99m/s 조건의 $y^+ = 200$ 이하에서는 평균유속이 다소 늦음을 알 수 있다. 평균유속이 로그법칙의 결과보다 다소 큰 외부영역을 포함한 속도결손영역의 평균유속분포는 속도결손법칙 (Velocity-defect law)과 비교 설명될 수 있다.

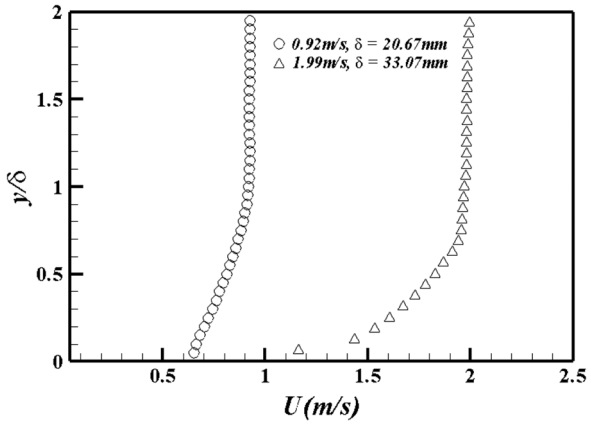


Fig. 4 Turbulent boundary layer measured over the flat plate

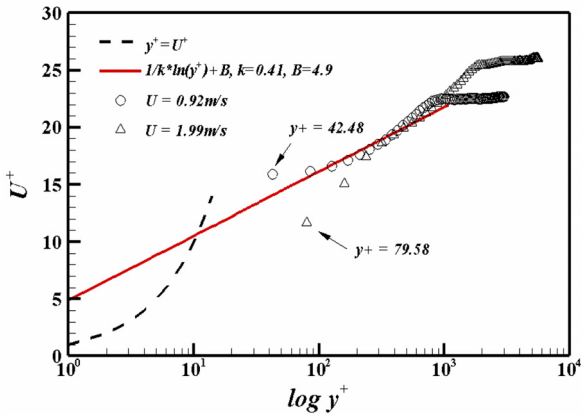


Fig. 5 Mean velocity profile measured over the flat plate

Table 2 Flow properties in boundary layer

Mean velocities	Properties	Results
0.92 m/s	δ	20.67 mm
	δ^*	2.54 mm
	θ	2 mm
	H	1.24
	Re_θ	1840
	u_τ	0.0411 m/s
1.99 m/s	C_F	0.004
	δ	33 mm
	δ^*	3.8 mm
	θ	2.77 mm
	H	1.37
	Re_θ	5373
	u_τ	0.077 m/s
	C_F	0.003

속도결손법칙은 전체 경계층의 약 80%를 차지하는 결손영역 (Defect layer)에서 평균유속이 로그법칙의 결과보다 크게 되는 와류의 기여(Wake contribution)를 고려하여 식 (15)로 표현된다 (Pope, 2000). 식 (15)에서 Von-Karman 상수(κ)는 0.41, Wake factor(Π)는 0.5를 적용하였다.

$$\frac{U_0 - \bar{U}}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} - \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + \Pi \left[2 - 2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{\delta}\right) \right] \quad (15)$$

δ : 경계층 두께

Fig. 6은 두 속도의 평균유속과 속도결손법칙의 결과 비교를 나타내며, 외부영역(Outer layer)에서 와류의 기여에 의한 평균유속의 증가 현상이 전반적으로 일치하는 경향을 보인다.

평판 위 흐름의 전단응력은 점성전단응력과 난류전단응력 (Turbulent shear stress) 성분으로 분류되고, 점성저층에서는 점성전단응력, 결손영역에서는 난류전단응력이 지배적이다. 난류전단응력에 기인하는 레이놀즈응력의 분포를 경계층 두께(δ)로 무차원화 된 높이에 대하여 Fig. 7에 나타내었다. 두 유속 모두 $y/\delta = 0.2 \sim 0.3$ 에서 레이놀즈응력이 최대이고, 완충층과 외부영

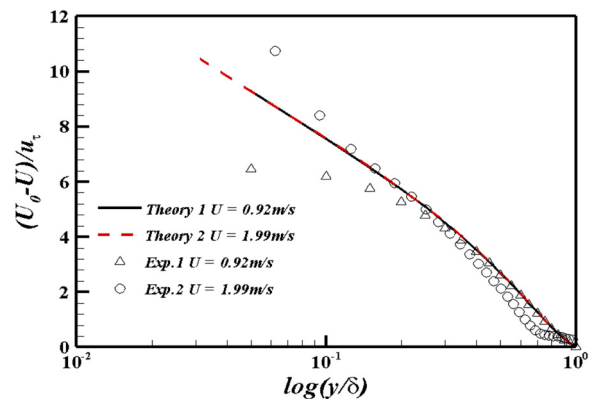


Fig. 6 Velocity deficit profile

역으로 갈수록 감소하는 현상을 볼 수 있다.

테일러 미시 길이척도(λ)는 난류운동에너지가 열로 소산되기 시작하는 길이척도(Length scale)를 나타내기도 하는데, 이는 난류속도성분 u' 의 자기상관함수(Autocorrelation function) 식 (16)을 이용하여 식 (17)에 의해서 결정할 수 있다.

$$\rho(r) = \frac{\langle u(x)u(x+r) \rangle}{\langle u(x)^2 \rangle} \tag{16}$$

$$\lambda = \frac{r}{\sqrt{1-\rho(r)}} \tag{17}$$

- $\rho(r)$: 속도장의 속도벡터간 거리에 따른 자기상관함수
- x : 속도장의 유동흐름 방향의 좌표
- r : 속도장의 속도벡터간 거리
- λ : 테일러 미시 길이척도

PIV에 계측된 250개의 순간 속도장에서 평판 위 y 방향으로 테일러 미시 길이척도(λ)를 계산하여 평균한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 난류경계층 내부에서는 평판에서 멀어질수록 테일러 미시 길이척도(λ)가 증가하다가 균일류 영역에 가까워질수록 감소하는 경향을 볼 수 있다.

난류운동에너지의 소산율은 난류속도 성분의 등방성 특성

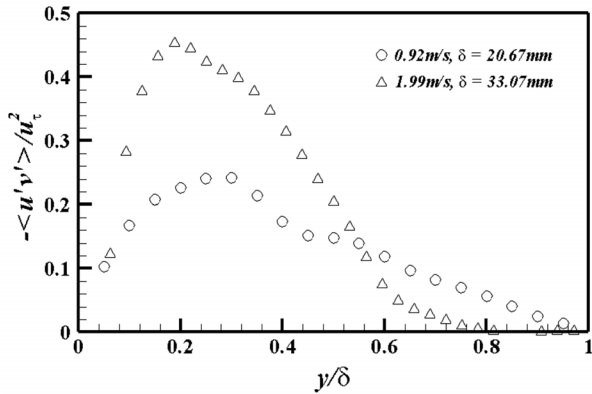


Fig. 7 Reynolds stress profile

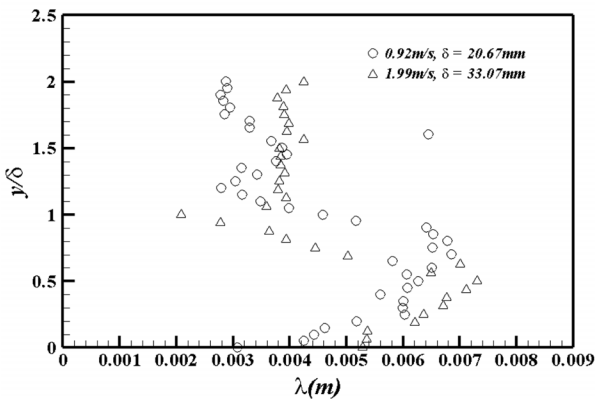


Fig. 8 Taylor microscale profile

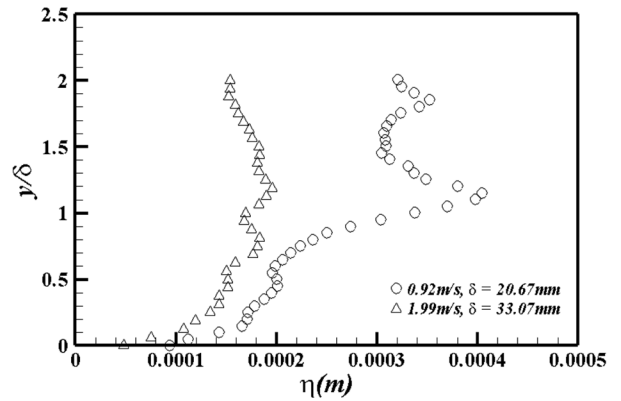


Fig. 9 Kolmogorov length scale profile

(Isotropy characteristics)을 적용하여 식 (18)에 의해서 평가할 수 있다. 콜로모프 길이척도(η)는 난류유동장의 가장 작은 길이척도로 난류운동에너지가 소산되는 과정에서 가장 작은 와류(Eddy)의 크기를 의미하기도 한다. 콜로모프 길이척도(η)는 난류 운동에너지의 소산율(ϵ , Dissipation rate) 식 (18)과 유체 동점성계수(ν)를 이용하여 평가할 수 있다(식 (19)).

$$\epsilon = 15\nu \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 \tag{18}$$

$$\eta = \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{19}$$

- ϵ : 에너지 소산율
- η : 콜로모프 길이척도

Fig. 9는 평판흐름의 콜로모프 길이척도(η)를 y 방향 분포도로 나타내었다. 유속 1.99 m/s 의 경우가 유속 0.92 m/s 보다 콜로모프 길이척도(η)가 전반적으로 작은 것을 알 수 있으며, 평판에 가까울수록 콜로모프 길이척도(η)가 감소하는 현상을 보인다. 이는 평판에 가까울수록 와류의 크기가 작고, 난류운동에너지의 소산율(ϵ)이 높음을 예상할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 PIV를 활용하여 $Re_\theta = 1840, 5373$ 인 평판 위 흐름 경계층내부 유동장을 계측하여 경계층 내부 난류특성을 연구하였다. 유동장 계측과 해석은 경계층의 약 80%를 차지하는 결손영역에서 수행하였다. 평균유속 수직분포 결과를 로그 법칙과 비교하였고, 와류의 기여에 의하여 외부영역에서 평균 유속의 증가 현상 나타내는 속도결손법칙의 결과와의 비교에서 다소 차이가 있었다. 이는 PIV실험 기법이 평판에 밀접한 영역에서 실험오차가 증가할 수 있는 가능성에 기인한 것으로 판단된다. 난류에서 총 평균응력(Total mean stress)은 점성전단응력과 레이놀즈응력의 합으로 구성된다. 이때 레이놀즈응력은 난류 운동이 평균 운동량 이동(Mean momentum transfer)에 큰

영향력을 가지기 때문에, 난류전단응력라고 일컫기도 한다. 즉, 평판 경계층 내부의 유동장 특성에서 레이놀즈응력의 분포가 y/δ 가 0.2~0.3에서 최대로 나타남을 보였다. 난류 유동장의 대표적인 길이척도인 테일러 미시 길이척도(λ)와 콜로모프 길이척도(η)의 경계층 내부에서 변화를 분석하였다. 이는 경계층 내부의 난류 특성을 표현하고 비교하기 위한 중요한 실험적 증빙자료로 활용될 것으로 판단된다.

최근 선박의 에너지 효율을 높이기 위하여 유체역학적 항력 감소 기법의 일환으로 미세기포를 활용한 마찰저항 저감에 대한 연구가 활발하다. 미세기포를 경계층 내부에 주입하여 마찰저항이 감소하는 효과는 여러 모형실험과 실선 검증에 의해서 입증되었으나, 감소이유에 대한 물리적 원인 규명을 위한 세밀한 연구가 필요하다. 경계층 내부 미세기포가 주입에 의해 경계층 내부의 평균 유속장 뿐 아니라, 난류적인 특성의 변화에서 마찰저항 저감효과의 원인을 규명할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 미세기포의 유무에 따라 경계층 내부 평균유속의 변화에 따라 유속분포(Mean velocity profile), 경계층 두께(Boundary layer thickness), 운동량 두께, 배제두께의 비교와, 난류속도성분에 의한 레이놀즈응력, 테일러 미시 길이척도(λ)와 콜모고로프 길이척도(η)의 변화의 비교가 마찰저항 저감 원인을 규명하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 좀 더 정밀한 실험을 통하여 경계층 내부의 난류운동 에너지 생성(Production), 이동(Transport), 대류(Advection), 소산(Dissipation) 항들의 균형에 대한 연구를 수행하여 향후 좀 더 발전된 연구 결과를 발표하고자 한다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부의 산업핵심기술사업인 “에너지절감을 위한 선박 저항감소 및 추진성능 향상 핵심기술 개발”과제의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단(또는 한국과학재단)의 지원을 받아 수행된 연구결과임(NRF-2009-0068310)을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

References

An, S.M., Ahn, H.T., 2011. Feasibility Study About Friction Drag Reduction Using Partial Air Cavity. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, 535-540.
 Clauser, F.H., 1954. Turbulent Boundary Layers in Adverse pressure Gradients. Journal of the Aeronautical Sciences, 21(2), 91-108.
 Crimaldi, J.P., 1998. Turbulence Structure of Velocity and

Scalar Fields Over a Bed of Model Bivalves. Stanford University.
 Jacob, B., Olivieri, A., Miozzi, M., Campana, E.F., Piva, R., 2010. Drag Reduction by Microbubbles in a Turbulent Boundary Layer. Physics of Fluids, 22(115104), 1-10.
 Kim, D.S., Kim, H.T., Kim, W.J., 2003. Experimental Study of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow with Microbubble Injection. Journal of Society of Naval Architects of Korea, 40(3), 1-8.
 Kwon, S.H., Yoon, S.Y., Kim, K.C., 2004. Experimental Study on the Three-Dimensional Topology of Hairpin Packet Structures in Turbulent Boundary Layers. Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, 28(7), 834-841.
 Latorre, R., Miller, A., Philips, R., 2003. Micro-bubble Resistance Reduction on a Model SES Catamaran. Ocean Engineering, 30, 2297-2309.
 Lewis, E.V., 1988. Principles of Naval Architecture Second Revision, Volume II., The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey.
 Nagamatsu, T., Kodama, T., Kakugawa, A., Takai, M., Murakami, K., Ishikawa, K., Kamirisa, H., Ogiwara, S., Yoshida, Y., Suzuki, T., Toda, Y., Kato, H., Ikemoto, A., Yamatani, S., Imo, S., Yamashita, K., 2002. A Full-scale Experiment on Microbubbles for Skin Friction Reduction using SEIUN MARU - Part 2: The Full-scale experiment. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 192, 15-28.
 Paik, B.G., Kim, K.R., Kim, J.H., Kim, K.S., Ahn, J.W., Kim, K.S., 2013. Skin Friction Measurement and Its Analysis Using Flow Visualization Techniques. Journal of Ships & Ocean Engineering, 53, 19-26.
 Paik, B.G., Pyun, Y.S., Kim, J.H., Kim, K.Y., Kim, K.S., Jung, C.M., Kim, C.K., 2012. Study on the Drag Reduction of 2-D Dimpled-Plates. Journal of Society of Naval Architects of Korea, 49(4), 333-339.
 Park, H., An, N.H., Park, S.H., Chun, H.H., Lee, I.W., 2010. PIV Investigation on the kin Friction Reduction Mechanism of Outer-layer Vertical Blades. Journal of the Korean Society of Visualization, 9(1), 20-28.
 Pope, S.B., 2000. Turbulent Flows. Cambridge University Press, Cambridge.
 Raffel, M., Willert, C.E., Kompenhans, J., 1998. Particle Image Velocimetry. Springer-Verlag, Berlin.
 Schlichting, H., Gersten, K., 2000. Boundary Layer Theory. Springer.