Journal of the KIMST, Vol. 22, No. 6, pp. 773-783, 2019
ISSN 1598-9127(print), 2636-0640(online)
DOI https://doi.org/10.9766/KIMST.2019.22.6.773

Research Paper 열 · 유체 부문

Large-Eddy Breakup Device가 수중운동체의 저항에 미치는 영향

김 준 석*,1)

1) 국방과학연구소 해양기술연구원

Influence of a Large-Eddy Breakup Device on Drag of an Underwater Vehicle

Joon-Seok Kim*,1)

1) *Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 25 July 2019 / Revised 15 August 2019 / Accepted 13 September 2019)

ABSTRACT

A numerical analysis of a turbulent flow with a ‘large-eddy breakup device(LEBU)’ was performed to investigate the influence of the device on the drag of underwater vehicle using commercial CFD code, FLUENT. In the present study, the vehicle drag was decomposed to skin-friction coefficient(C_f) and pressure coefficient(C_p). The variation of the vehicle C_f and C_p were observed with changing location of the device and Reynolds number. As a result, the device decreased the vehicle C_f because it suppressed the turbulent characteristics behind the device. The larger Reynolds number, the higher reduction effect when the device was placed in front part of, and near the vehicle. On the other hand, the device increased/decreased the vehicle C_p with increasing/decreasing turbulent kinetic energy at recirculating flow region behind the vehicle. The total drag change by the device was caused by C_p rather than C_f.

Key Words : Drag(저항), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Flow Control(유동 제어)

기 호 설 명

C_f	Skin-friction coefficient	[-]
C_p	Pressure coefficient	[-]
C_d	Drag coefficient	[-]
Re	Reynolds number	[-]
x	Streamwise position	[m]
y	Wall-normal position	[m]
L	Length	[m]
R	Radius	[m]
T	Thickness	[m]
A	Area of surface	[m^2]
p	Pressure	[Pa]

* Corresponding author, E-mail: joonseok_kim@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

Cor	Correlation coefficient	[-]
< >	Sample mean value	[-]

그리스 문자

τ_w	wall shear stress	[Pa]
ρ	Density	[kg/m^3]
μ	Dynamic viscosity	[Pa • s]

상 첨 자

—	Mean value
′	Fluctuation value

하 첨 자

L	Variable of LEBU	[-]
v	Variable of underwater vehicle	[-]
∞	Variable of free-stream	[-]
LE/*TE*	Variable of leading/trailing edge	[-]

1. 서 론

층류 유동(laminar flow)에 비해 난류 유동(turbulence flow)은 물체에 높은 항력을 일으키며, 이는 공학적 응용에서 효율을 낮추는 원인이 된다. 항력을 감소시키는 것은 경제적으로 상당한 비용 절감을 달성할 수 있기에, 오늘날까지 공학자들은 항력 저감을 위한 유동 제어(flow control) 기술을 개발해오고 있다[1]. 유동 제어는 에너지의 투입 유무에 따라 능동 제어(active control)와 수동 제어(passive control)로 구별된다.

수동 제어 방법의 하나로써, 난류 조절(turbulence manipulation)을 목적으로 벽에서 떨어진 유동 경계 외층에 얇은 직사각형 장비를 설치하는 경우 벽의 표면마찰(skin friction)을 감소시킬 수 있음이 발견되었다[2]. 이는 이후 'LEBU(large-eddy breakup device)'로 명명되어 LEBU의 형상 및 위치를 바꿔가며 항력 감소에 대한 가능성에 관해 많은 연구가 진행되었다[3-5]. 그 결과 LEBU는 벽의 표면마찰 감소에 효과적이나, LEBU 자체의 형상저항을 포함한 전체 시스템의 항력은 오히려 증가한다는 결론에 도달하였다[4,5].

LEBU가 어떤 메커니즘으로 표면마찰을 감소시키는 연구는 오늘날까지 이어져 오고 있다. 특히 전산유체역학의 발달은 실험으로 확인하기 어려운 3차원 속도 및 와도유동장에 대한 정밀한 분석을 가능하게 하였다. 최근 컴퓨터의 비약적인 성능 발달은 직접수치모사(direct numerical simulation)를 통해 난류의 응집 구조(coherent structure)에 대한 자세한 분석이 가능해졌으며[6], 이를 이용하여 응집 구조가 표면마찰에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되었다[7,8]. 최근에는 직접수치모사를 통해 LEBU에 의한 응집 구조의 변화와 표면마찰의 변화 간의 상관관계가 규명되었다[9].

기존 LEBU에 대한 연구는 긴 평판 위에 LEBU를 설치하여 경계층 유동에서의 표면마찰 감소에 관한 연구가 주로 진행되었으며, 다양한 형상을 가지는 물체에 대한 LEBU의 효과를 살펴 본 연구는 부족하다. 또한 공학적 응용에서 중요한 압력에 의한 형상저항에 대하여 LEBU가 미치는 영향에 대한 연구는 진행된 바 없다.

본 연구의 목적은 전산유체역학을 이용하여 수중에서 움직이는 운동체(underwater vehicle)에 LEBU를 설치함으로 인해 변화하는 주유동방향으로의 항력을 관찰하는 것이다. 여기서 항력은 전단응력으로 인한 표면마찰과 압력으로 인한 형상저항으로 나누어 분석된다. 2장에서는 전산해석을 위한 기법 및 계산 영역 설정에 대한 내용을 담고 있으며 3장에서는 계산 결과에 대한 분석 내용을, 4장에서는 본 연구의 결론을 요약하고 있다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서 유동 해석에 사용된 소프트웨어는 상용 유동해석 프로그램인 Ansys FLUENT를 사용하였다. 유동은 비압축성 정상상태로 가정하며, 지배방정식으로는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 채택하였다. 레이놀즈 응력항에 대한 난류 모델링은 비슷한 형상의 수중운동체의 저항 모사가 실험결과와 가장 비슷하다고 알려진 2-방정식 모델 중의 하나인 $k - \omega$ SST(Shear Stress Transport) 모델을 채택하였다[11].

수중운동체 및 LEBU는 기하적으로 운동체의 중심선을 기준으로 원주방향으로 선대칭(axisymmetric)이므로, 계산 영역과 유동장은 2차원으로 모델링되어 해석된다. Fig. 1은 본 연구에서 설정된 계산 영역을 보여주고 있다. 여기서 모델링된 수중운동체는 머리부분이 0.2 m의 반경(R_v)을 가지는 사분원으로, 몸체 및 꼬리부분은 길이(L_v)가 4 m인 직사각형의 형상을 가진다. LEBU의 경우 길이(L_L)와 두께(T_L)가 각각 200 mm, 1 mm의 직사각형으로 모델링되었다. 수중운동체의 몸체와 중심선이 만나는 부분을 원점으로 설정하였으며, 주유동방향을 x, 주유동방향과 수직인 방향을 y로 설정했다.

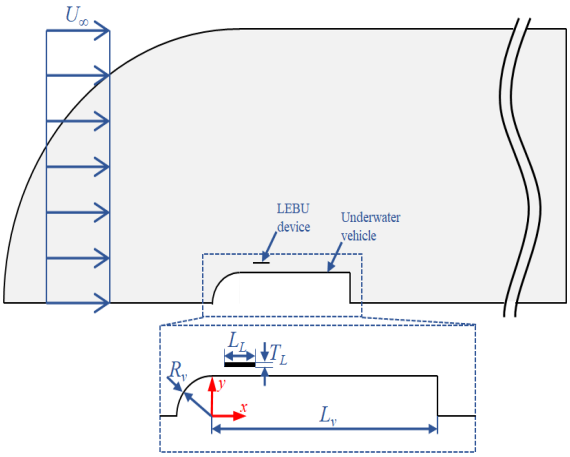

Fig. 1. Schematic diagram of computational domain

유동의 입구 경계조건으로는 x-방향으로의 자유흐름 속도(U_∞)를 부여함과 동시에 1 %의 난류 강도를 설정하였다. 출구 경계조건은 노이만 경계조건을 부여하고자 outflow로 설정하였다. 계산 영역의 윗 부분은 자유흐름 경계조건을 부여하기 위해 대칭 경계조건을 부여하였다. 수중운동체와 LEBU의 표면은 점착 조건(no-slip)으로 설정하였으며, 수중운동체의 중심축을 기준으로 선대칭을 이루므로 중심축에 대하여 대칭 경계조건을 부여하였다. 계산에 사용되는 작동유체는 상온의 물(H_2O) 특성을 부여하였다.

계산을 위한 격자는 사변형(quadrilateral) 격자로 구성하였다. 본 계산을 수행하기에 앞서 해석 결과의 격자 의존성을 검증하기 위해, 대조군으로 이용될 LEBU가 없는 경우에 대하여 4가지 격자 구성에 대한 예비해석을 진행하였다. 4가지 case에 대해 수중운동체 표면에 설정된 격자 수, 첫 번째 격자 간격 및 표면 근방에서 수직한 방향으로의 격자 간격 증가 비율에 대한 정보를 Table 1에 표기하였다. 각 case별 최종 격자 시스템의 node 수는 각각 305304, 259674, 205904 그리고 169719로 설정되었다. Fig. 2는 수중운동체 표면에서 전단응력 τ_w 및 압력 p를 나타낸 것이다. case 3의 격자수와 구성을 사용하는 경우 격자 의존성을 해소함과 동시에 계산 시간의 최적화를 이룰 수 있음을 확인할 수 있다. 본 계산에서는 case 3의 격자 구성을 바탕으로 해석을 진행했으며, LEBU 주변의 격자 설정 또한 수중운동체 근방의 설정과 동일하게 부여하였다. Fig. 3은 본 계산에서 대조군(w/o LEBU)과 LEBU가 있는 경우에 대하여 수중운동체의 머리(leading edge), 꼬리(trailing edge) 및 LEBU 주변의 격자 구성을 보여주고 있다.

Table 1. Grid information near the underwater vehicle

	Number of node (leading, side, trailing edge)	minimum y^+ of first node (leading, side, trailing edge)	stretching ratio
case 1	70, 500, 90	0.81, 0.27, 0.51	1.05
case 2	60, 450, 80	1.01, 0.33, 0.63	1.05
case 3	60, 400, 70	1.01, 0.33, 0.63	1.08
case 4	55, 400, 60	1.20, 0.38, 0.75	1.10

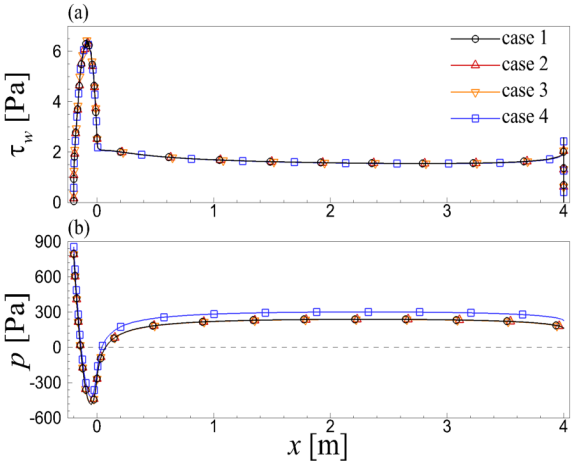

Fig. 2. Grid dependency test on the vehicle surface

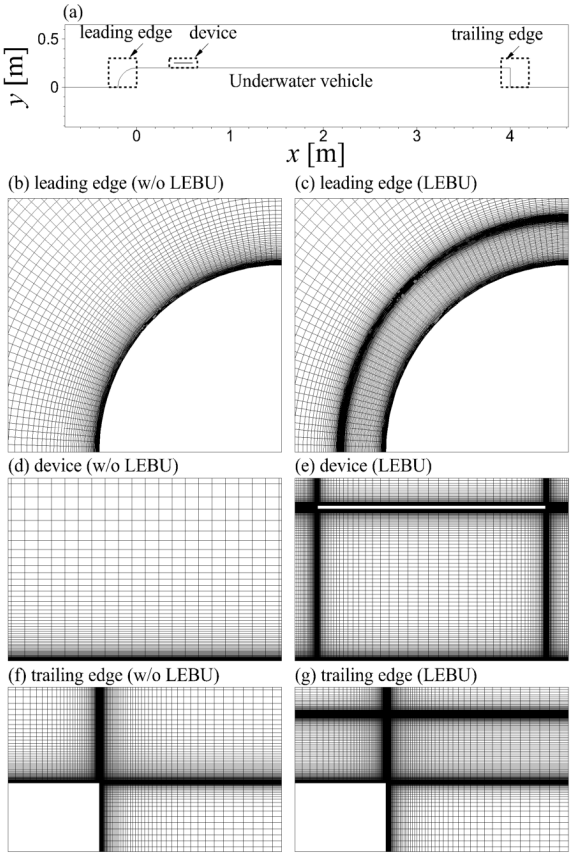

Fig. 3. Grid configuration near the underwater vehicle

LEBU의 위치 변화에 따른 수중운동체의 저항을 분석하고자 설치 위치를 x- 및 y-방향에 대하여 변화시켜가며 계산을 수행했다. Table 2는 본 계산에서 수행될 LEBU의 머리 부분의 x- 및 y-방향의 위치(x_L, y_L)를 나타내고 있다. LEBU의 위치는 수중운동체의 길이 및 반경으로 무차원화하여 표기한다. LEBU 위치에 대한 자세한 표현은 Fig. 4에 표현되고 있다. 동일 LEBU 위치에 대하여 레이놀즈수(Re) 변화에 의한 저항 변화의 영향을 관찰하기 위해 본 연구에서 사용된 Re 또한 Table 2에 기재되어 있다. 여기서 Re는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \tag{1}$$

여기서 ρ와 μ는 각각 유체의 밀도 및 점성계수를 의미한다.

Table 2. Parametric variables of this study

Parametric variables	
x_L/L_v	0, 0.125, 0.375, 0.625, 0.875, 1.0
$(y_L-R_v)/R_v$	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25
Re	49761, 95521, 199043

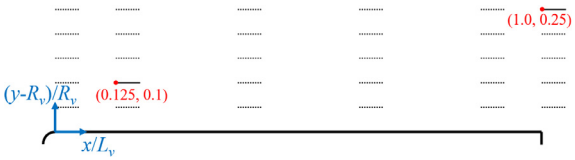

Fig. 4. Schematic diagram of position of LEBU

3. 계산 결과

유동에 의해 수중운동체에 작용하는 저항력은 τ_w 및 p에 의해 발생하며, 전자에 의한 영향력은 무차원수인 표면마찰계수로 나타나며, 후자에 의한 영향력은 무차원수인 압력계수로 나타난다. 수중운동체 표면에서 계산되는 τ_w로부터 도출되는 x-방향의 국부표면마찰계수(C_f)는 식 (2)와 같이 계산되며, 평균표면마찰계수($\overline{C_f}$)는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$C_f = \frac{\tau_w(\hat{i} \cdot \hat{t})}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \tag{2}$$

$$\overline{C_f} = \frac{1}{A_v}\int_S C_f \, dA_v \tag{3}$$

여기서 $\hat{i}$ 및 $\hat{t}$는 U_∞의 단위벡터와 수중운동체의 표면과 접한 방향으로의 단위벡터를 의미하며, A_v는 수중운동체의 표면 넓이를 의미한다.

마찬가지로 x-방향의 국부압력계수(C_p) 및 평균압력계수($\overline{C_p}$)는 각각 식 (4) 및 (5)와 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{(p-p_\infty)(\hat{i} \cdot \hat{n})}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \tag{4}$$

$$\overline{C_p} = \frac{1}{A_v}\int_S C_p \, dA_v \tag{5}$$

여기서 $\hat{n}$은 수중운동체의 표면과 수직한 방향으로의 단위벡터를 의미한다. 본 연구에서 ΔX의 의미는 식 6와 같이 정의되며, 대조군과 LEBU가 있는 경우에서 X 변수의 상대적인 차이를 뜻한다.

$$\Delta X(\%) = \frac{X_{LEBU} - X_{w/oLEBU}}{X_{w/oLEBU}} \times 100 \tag{6}$$

Fig. 5는 LEBU를 설치함으로 인해 변화하는 수중운동체의 $\overline{C_f}$를 Re 별로 보여주고 있다. LEBU를 설치하는 경우, 모든 조건 하에서 $\overline{C_f}$가 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 동일 위치일 경우 Re가 높아질수록 $\overline{C_f}$의 감소량이 커지는 것을 확인할 수 있다. $\overline{C_f}$ 감소 효과가 최대로 되는 LEBU의 최적 위치는 Re 별로 다르나, Re가 높아질수록 수중운동체의 전방 및 가까이 붙어있는 쪽으로 이동되는 것을 확인할 수 있다.

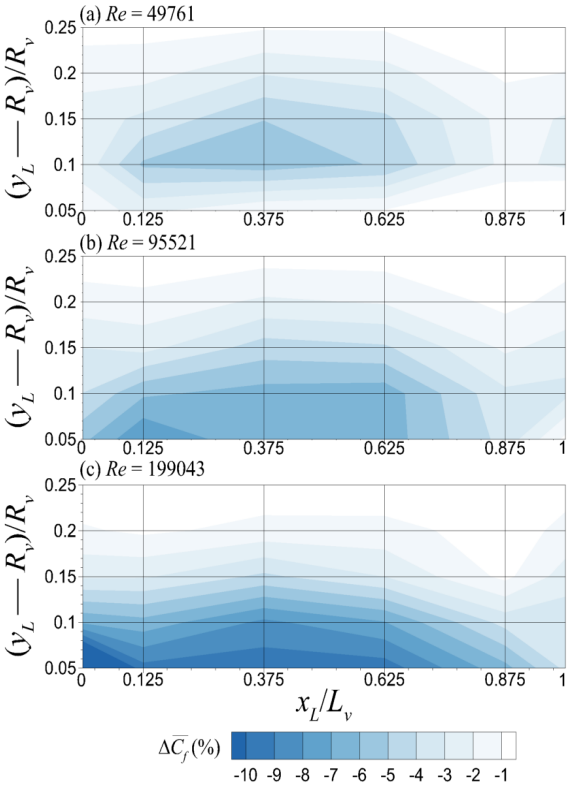

Fig. 5. $\overline{C_f}$ changes due to the location of LEBU according to Re

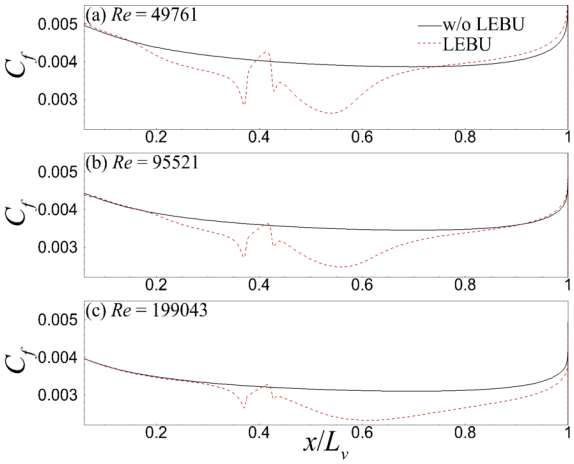

Fig. 6. Comparison of C_f profiles when x_L/L_v = 0.375 and y_L/R_v = 0.1 according to Re

Fig. 6은 동일 위치에 LEBU가 설치되어 있을 경우 Re의 변화에 따라 달라지는 수중운동체의 C_f를 나타내고 있다. LEBU의 전방 영역을 살펴보면, Re가 낮을수록 C_f의 최대 감소량 및 C_f의 감소 효과 범위가 넓어지는 것을 알 수 있다. LEBU의 후방 영역을 살펴보면 C_f의 최대 감소량은 Re가 낮을수록 크지만 감소 효과 범위는 반대로 Re가 높을수록 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, C_f가 회복된 지점(Re가 49761인 경우 x/L_v = 0.743, Re가 95521인 경우 x/L_v = 0.908) 이후를 살펴보면 C_f가 대조군보다 높아지는 현상을 발견할 수 있다. 결론적으로 $\overline{C_f}$ 감소에 대하여 Re가 높아질수록 LEBU 전방 영역의 기여도가 낮아지고 반대로 후방 영역의 기여도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 Re가 낮은 경우에는 LEBU를 중간에 위치시켜 전방 영역을 상대적으로 넓게 가져갈수록 $\overline{C_f}$의 감소 효과가 크며, 반대로 Re가 높은 경우에는 LEBU의 위치를 상대적으로 앞당겨 후방 영역을 보다 넓게 가져갈수록 $\overline{C_f}$의 감소 효과가 큰 것을 알 수 있다.

LEBU 후방에서 C_f가 감소하는 이유를 찾기 위해, Fig. 6에서 확인할 수 있는 LEBU 후방에서 최대로 C_f가 감소하는 지점에서의 y-방향으로의 무차원화된 레이놀즈 전단응력(Reynolds shear stress)을 Fig. 7에 표시하였다. 본 연구에서는 레이놀즈 전단응력을 직접 계산하기 어려우므로, 식 (7)의 Boussinesq eddy viscosity assumption을 통해 계산하였다.

$$-\overline{u_i'u_j'}=\frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(k+\frac{\mu_t}{\rho}\frac{\partial U_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \qquad (7)$$

여기서 μ_t, k 및 δ는 각각 난류 점성계수(turbulent viscosity), 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy) 및 크로네커 델타(Kronecker delta)를 의미한다.

Fig. 7은 *Re*에 관계없이 LEBU가 벽과 떨어져 설치되더라도 수중운동체의 표면 근방에서 레이놀즈 전단응력을 감소시키는 효과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 특히 표면 근처의 레이놀즈 전단응력의 감소량이 클수록 C_f의 감소량이 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 두 변수 간에 양의 상관관계가 있기 때문이다[7]. 결과적으로 LEBU 후방에서의 C_f 감소 이유는 레이놀즈 전단응력의 감소로 인한 난류성분의 기여도 감소 때문이며, 이는 기존 연구결과와 잘 일치하는 결과이다[9].

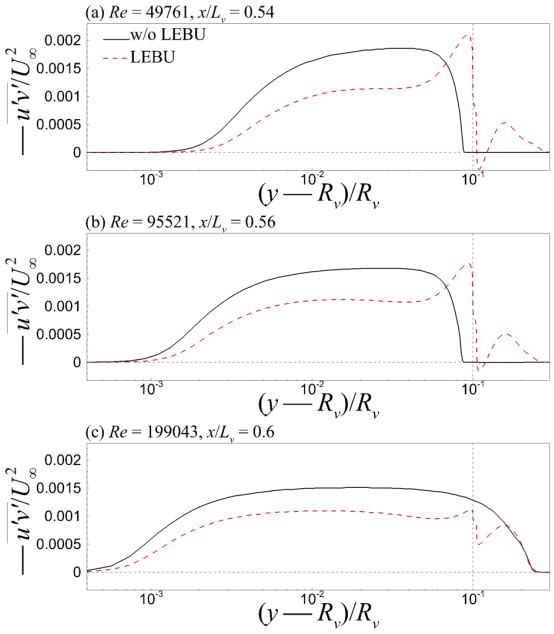

Fig. 7. Comparison of reynolds shear stress profile along the *y*-direction when x_L/L_v = 0.375 and y_L/R_v = 0.1 where maximum C_f reduction occurred according to *Re*

Fig. 8은 동일한 *Re*에서 LEBU의 설치 위치별로 변화하는 C_f의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 7.(a) 및 7.(b)는 각각 *x*-방향 및 *y*-방향으로의 LEBU 위치 변화를 나타낸다. 우선 *x*-방향으로의 변화를 살펴보면, LEBU가 수중운동체의 전방에 위치할 경우 머리 부분의 높은 C_f를 크게 감소시킬 수 있으나, LEBU 후방 영역이 넓어진 만큼 후방에서의 감소 효과를 많이 가져갈 수 없다. 그러나 *Re*가 높은 경우 넓어진 후방 영역의 C_f를 계속 감소시킬 수 있으므로, *Re*가 높을수록 LEBU를 전방에 위치시키는 것이 $\overline{C_f}$ 관점에서 유리하다.

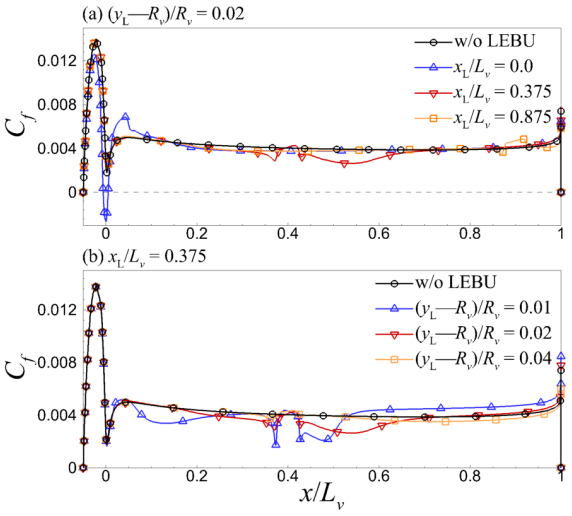

Fig. 8. Comparison of C_f profiles by varying location of LEBU at *Re* = 49761

y-방향으로의 위치 변화 효과는 *Re*의 변화 효과와 비슷하다. 수중운동체에 가깝게 위치할수록 낮은 *Re*에서의 효과와 유사하며, 반대로 멀어질수록 높은 *Re*에서의 효과와 유사하다. 낮은 *Re*에서는 LEBU를 수중운동체 표면에 가깝게 위치시킬 경우 LEBU 전방의 C_f 감소 효과를 극대화할 수 있으나, 후방에서의 C_f 감소 영역이 급격히 줄어들며, 오히려 많은 부분에서 증가된 C_f가 관찰된다. 그러나 *Re*가 높은 경우 후방에서의 C_f 감소 영역을 계속 유지시킬 수 있으므로 LEBU를 수중운동체에 보다 가깝게 위치시키는 것이 효과적이다. 즉 *y*-방향의 위치 변화는 LEBU 후방에서 발생하는 C_f 역전 현상이 일어나지 않는 범위 내에서 수중운동체에 가깝게 위치시키는 것이 가장 효과적이라고 할 수 있다. 이러한 관점에서, 만약 본 계산 영역보다 LEBU를 더욱 가깝게 위치시키는 경우 높은 *Re*에서도 $\overline{C_f}$ 감소 효과가 줄어드는 지점이 나타날

것으로 예상할 수 있다.

Fig. 9는 LEBU의 설치 위치에 의해 변화하는 수중운동체의 $\overline{C_p}$를 *Re* 별로 보여주고 있다. LEBU가 수중운동체의 머리부분에 위치하는 경우(x_L/L_v = 0) $\overline{C_p}$가 최소 18 %에서 36 %까지 증가되는 것으로 확인되었다. 주목할 점은 LEBU가 수중운동체의 꼬리부분(x_L/L_v = 1) 혹은 수중운동체와 가장 멀리 위치하는 경우, *Re*가 낮은 경우에는 $\overline{C_p}$가 증가되었지만 *Re*가 높은 경우에는 오히려 $\overline{C_p}$가 낮아지는 경향을 보인다. 그 외 영역에 위치할 경우 주로 LEBU가 수중운동체와 가까워질수록 $\overline{C_p}$가 커지는 경향을 보이며, $\overline{C_f}$의 변화와 마찬가지로 *Re*가 높을수록 $\overline{C_p}$의 변화량이 커지는 것을 확인할 수 있다.

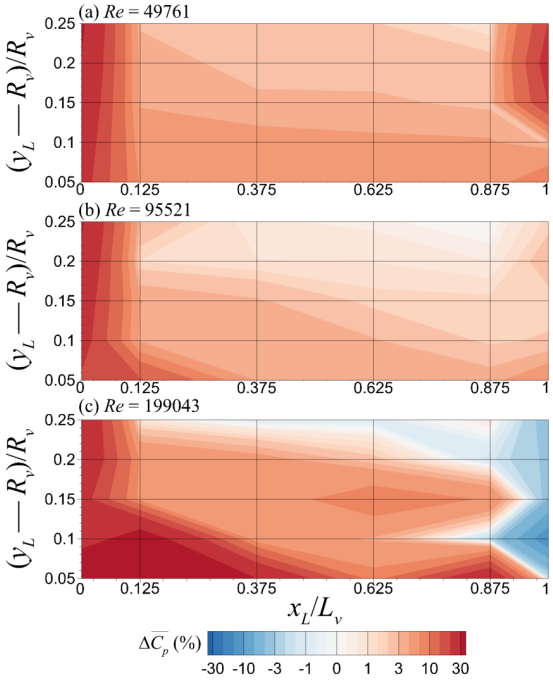

Fig. 9. $\overline{C_p}$ changes due to the location of LEBU according to *Re*

x-방향의 $\overline{C_p}$는 식 (8)과 같이 수중운동체의 머리부분에서 발생하는 $\overline{C_p}(\overline{C_{p,LE}})$ 및 꼬리부분에서 발생하는 $\overline{C_p}(\overline{C_{p,TE}})$로 분해되며, 수중운동체 옆면에서 발생하는 압력에 의한 힘은 *x*-방향으로의 힘을 가지지 못하므로 0으로 계산된다.

$$\overline{C_p} = \overline{C_{p,LE}} + \overline{C_{p,TE}} \tag{8}$$

Fig. 10은 LEBU의 설치 위치에 의한 $\overline{C_{p,LE}}$의 변화를 보여주며 Fig. 11은 $\overline{C_{p,TE}}$의 변화를 보여주고 있다. 우선 $\overline{C_{p,LE}}$를 살펴보면 LEBU가 수중운동체의 머리부분에 위치하는 경우(x_L/L_v = 0) 최소 50 %에서 최대 80 %에 육박하는 $\overline{C_{p,LE}}$의 증가량이 확인된다. 반면 LEBU가 수중운동체 머리부분 이외의 위치에 존재하는 경우, $\overline{C_{p,LE}}$의 변화는 1 % 미만으로 거의 변화가 없다. $\overline{C_{p,TE}}$의 변화를 살펴보면 x_L/L_v = 0의 경우 $\overline{C_{p,LE}}$와 반대로 큰 감소를 보이고 있는데, 이는 수중운동체 후방에서 압력이 증가되었음을 의미한다. 또한 $\overline{C_{p,LE}}$와 달리 모든 LEBU 위치에서 $\overline{C_{p,TE}}$가 변화됨을 확인할 수 있으며, 이는 수중운동체의 $\overline{C_p}$ 변화는 주로 $\overline{C_{p,TE}}$의 변화에 의한 결과임을 의미한다.

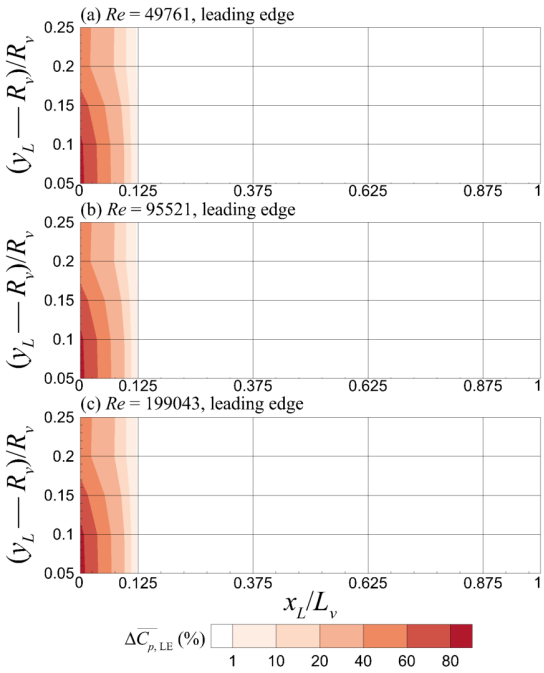

Fig. 10. $\overline{C_{p,LE}}$ changes due to the location of LEBU according to *Re*

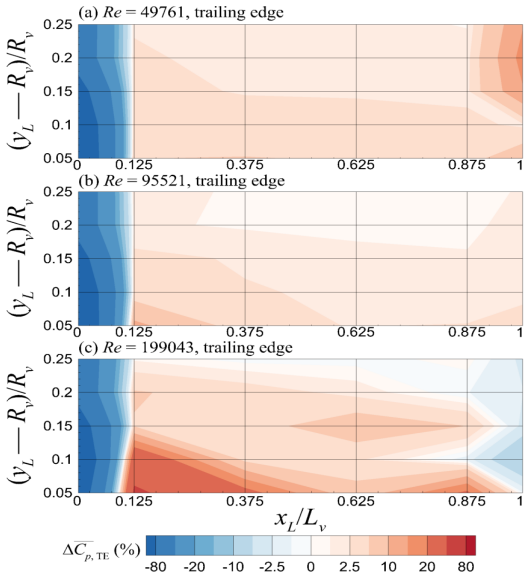

Fig. 11. $\overline{C_{p,TE}}$ changes due to the location of LEBU according to *Re*

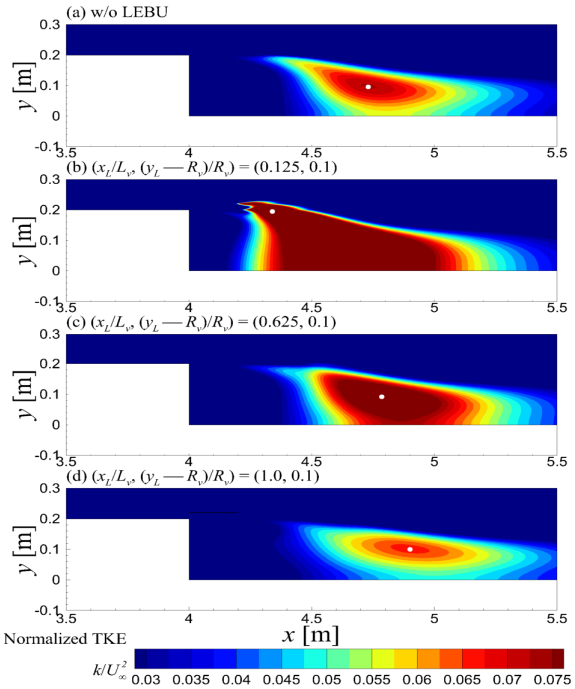

Fig. 12. Normalized *k* at recirculating region behind the trailing edge of the underwater vehicle when *Re* = 199043. White dots mean where the maximum *k* occurs

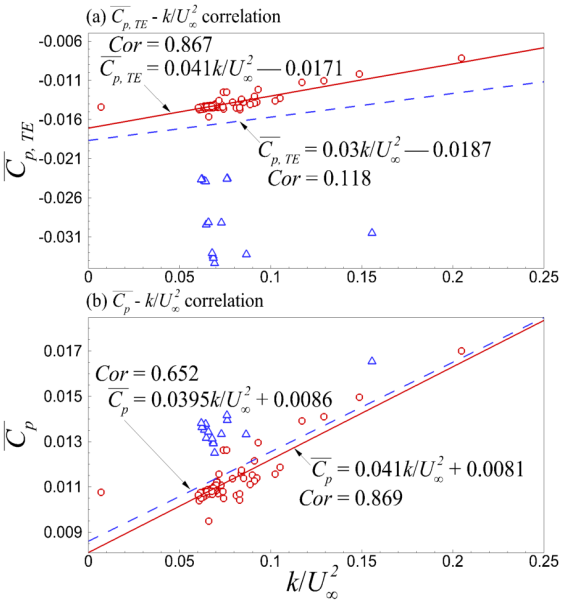

Fig. 13. Scatter plot between $\overline{C_{p,TE}}/\overline{C_p}$ and normalized *k*. blue-delta symbols represent x_L/L_v = 0 and red-circle symbols indicate the others. red-solid and blud-dashed lines mean the trend line

Fig. 11은 높은 *Re* 영역에서 LEBU를 수중운동체 후방에 설치할 경우 수중운동체 꼬리부분에서의 압력이 증가됨으로써 $\overline{C_{p,TE}}$가 감소, 궁극적으로 전체 $\overline{C_p}$가 감소되었음을 의미하고 있다. 이를 분석하기 위해서는 수중운동체 후방의 유동장을 분석할 필요가 있다. Fig. 12는 높은 *Re* 영역에서 수중운동체 후방에서 발생하는 재순환영역에서의 *k*를 보여주고 있다. 대조군(Fig. 12.a)에 비해 $\overline{C_{p,TE}}$가 증가한 경우 후방에서 *k*가 증가하는 경향을 보인다(Fig. 12.a, 12.b). 반면 $\overline{C_{p,TE}}$가 감소된 경우, *k*가 줄어드는 것을 확인할 수 있다(Fig. 12.d).

무차원화된 *k*와 $\overline{C_{p,TE}}$ 및 $\overline{C_p}$의 관계를 살펴보기 위해 Fig. 13은 본 연구에서 계산된 모든 경우에 대한 두 변수의 산점도를 나타내고 있다. 파란색 삼각 심볼은 x_L/L_v = 0인 경우의 데이터이며, 붉은색 원형 심볼은 그 외의 경우를 나타낸다. 파란색 점선은 x_L/L_v = 0의 경우를 포함한 모든 데이터의 추세선이며, 붉은색 실선은 x_L/L_v = 0의 경우를 제외한 데이터의 추세선이

다. 두 변수간의 상관관계를 구하기 위해 상관계수(*Cor*)를 식 (9)와 같이 정의하고 그 결과를 그림에 함께 표시하였다.

$$Cor = \frac{\sum_N (X - \langle X \rangle)(Y - \langle Y \rangle)}{\sqrt{\sum_N (X - \langle X \rangle)^2 \sum_N (Y - \langle Y \rangle)^2}} \quad (9)$$

여기서 N은 본 계산에 사용된 모든 표본의 수를 의미하며, 〈 〉 는 해당 변수의 표본평균을 의미한다. 우선 Fig. 13.a에서 k와 $\overline{C_{p,TE}}$의 관계를 살펴보면 x_L/L_v = 0인 경우를 제외하고 강한 양의 선형적 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 에어포일 등의 역압력구배가 형성되는 물체 후방에서의 유동박리 등으로 인한 난류 소용돌이(turbulent eddy) 영역에서 압력감소가 일어나는 것과 동일한 현상으로 이해할 수 있다. 유동의 전체 에너지가 보존된다는 점에서, 난류 소용돌이 형성으로 인한 난류 운동에너지의 증가는 반대로 퍼텐셜 에너지의 감소를 의미, 궁극적으로 압력 감소를 일으킨다. 실제로 재순환영역에서의 k-budget을 계산한 결과 경계층 유동에 비해 압력확산항(pressure diffusion term)에 의한 k의 생성량이 상당히 높아진 것을 과거 연구 사례에서 확인할 수 있다.[10] 결과적으로 이 영역에서의 k와 압력 사이에서는 음의 상관관계를 가지며, 압력과 $\overline{C_{p,TE}}$ 간에는 반비례하기 때문에 결과적으로 $\overline{C_{p,TE}}$와 k 사이에는 양의 상관관계를 가지는 것이다. 이 결과와 Fig. 11의 결과를 함께 분석하면, 상대적으로 앞쪽에 위치한 LEBU는 바로 후방에서의 난류적 특성을 약화시킴으로써 수중운동체의 $\overline{C_f}$를 감소시키지만, 후방으로 먼 거리에 있는 유동의 난류적 특성을 오히려 강화시키는 결과를 불러온다는 것이다. 재순환유동 영역에서 강화된 난류 특성은 결국 수중운동체 후방에서의 $\overline{C_{p,TE}}$를 증가시키는 결과를 가져온다. 반면 LEBU가 수중운동체 후방에 위치하는 경우 수중운동체의 $\overline{C_f}$ 측면에서 효과적이지 못하지만, 반대로 재순환영역에서의 난류 특성을 약화시킴으로써 난류 소용돌이의 생성 및 퍼텐셜 에너지로부터의 난류 운동에너지 전환을 억제함으로써 궁극적으로 $\overline{C_{p,TE}}$를 감소시키는 결과를 가져온다. 이러한 경향은 *Re*가 높은 경우에서만 효과적이며, 낮은 *Re*에서는 후방에 설치된 LEBU를 통한 $\overline{C_{p,TE}}$는 오히려 증가하는 경향을 보인다.

반면 x_L/L_v = 0인 경우에는 k와 $\overline{C_{p,TE}}$ 간의 상관계수는 0.118로, 두 변수 사이의 상관관계가 거의 없는 결과를 보인다. 이는 LEBU를 최전방에 설치할 경우 유동의 에너지가 수중운동체 머리부분에서 높은 $\overline{C_{p,LE}}$를 발생시키는 데에 소모되기 때문으로 보인다. 그러나 Fig. 13.b에서 보여주듯이 전체 $\overline{C_p}$의 관점에서 살펴보면 x_L/L_v = 0을 포함한 전체 데이터도 0.652의 상관계수를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 k가 $\overline{C_{p,TE}}$ 뿐만 아니라 수중운동체의 전체 압력저항인 $\overline{C_p}$와도 양의 상관관계를 가지는 것을 의미한다. 이 결과는 수중운동체의 전체 항력과 k 사이에 비례하는 관계가 있다고 보고한 기존의 연구 결과와 일치한다[11].

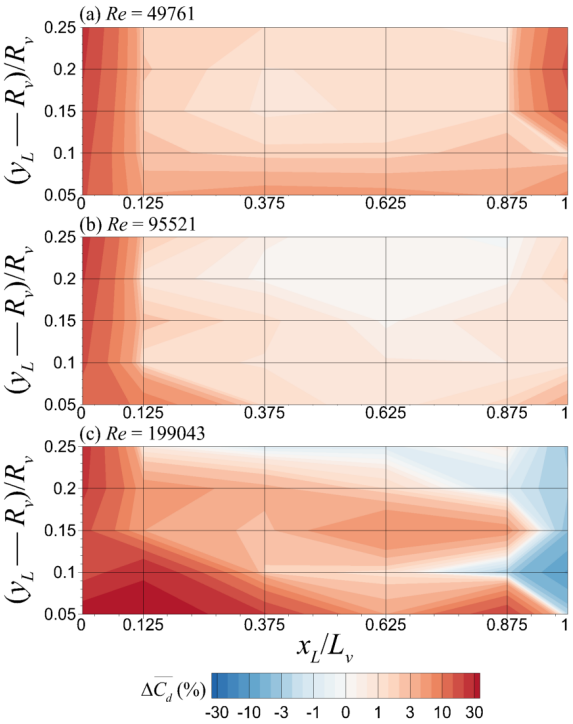

Fig. 14. $\overline{C_d}$ changes due to the location of LEBU according to *Re*

수중운동체의 전체 저항을 대표하는 무차원수는 평균항력계수($\overline{C_d}$)이며, $\overline{C_d}$는 $\overline{C_f}$와 $\overline{C_p}$의 합으로 표현

된다. Fig. 14는 LEBU를 설치함에 따라 변화하는 $\overline{C_d}$를 표현하고 있다. 수중운동체의 $\overline{C_d}$에 대하여 $\overline{C_f}$보다 $\overline{C_p}$의 기여도가 높은 점, 그리고 $\overline{C_f}$의 변화에 비해 $\overline{C_p}$의 변화값이 크기 때문에 전체 $\overline{C_d}$의 변화는 주로 $\overline{C_p}$의 변화가 주도하고 있음을 알 수 있다. 대부분의 영역에서 $\overline{C_d}$가 증가하는 방향으로 변화하였으나, *Re*가 높은 경우 LEBU를 수중운동체의 꼬리부분 근방에 위치시키는 경우 $\overline{C_p}$의 감소를 통해 최대 10.4 %의 수중운동체 $\overline{C_d}$ 감소를 기대할 수 있다.

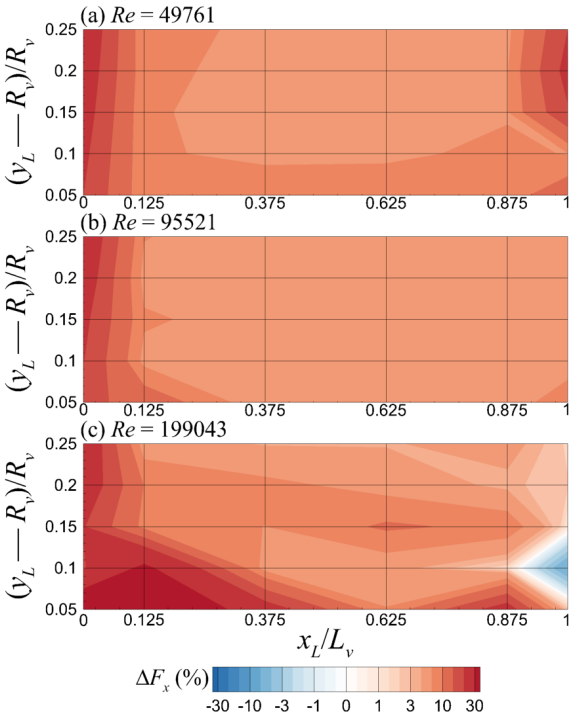

Fig. 15. Change in overall F_x of the system due to the location of LEBU according to *Re*

마지막으로 Fig. 15는 LEBU의 저항을 고려했을 때 변화하는 전체 시스템의 저항을 나타내고 있다. LEBU의 저항을 함께 고려하는 경우 힘이 작용하는 면적이 증가하기 때문에 무차원화된 $\overline{C_d}$를 통한 비교가 어려우므로, 여기서는 무차원화되지 않은 *x*-방향의 힘(F_x)을 직접 비교하였다. Fig. 14와 15의 데이터를 비교하면 LEBU를 포함했을 경우 전체 저항 변화는 조건별로 다르지만 최소 3 %에서 최대 6 % 가량 증가한 것이 확인되었다. 주목할 점은 *Re*가 높고 LEBU가 수중운동체 꼬리에 위치할 경우 LEBU를 고려하더라도 저항 저감 효과를 기대할 수 있다는 것이며, 저감 수치는 약 5 %로 계산되었다.

4. 결 론

지금까지 본 연구는 LEBU에 의해 변화하는 수중운동체의 저항에 대하여 LEBU의 위치 및 *Re*가 변화할 때 $\overline{C_f}$와 $\overline{C_p}$의 변화가 어떻게 달라지는지에 대하여 분석하였다. $\overline{C_f}$의 경우 LEBU 후방에서의 레이놀즈 전단응력이 억제됨에 따라 감소됨을 확인했으며, $\overline{C_p}$의 경우 수중운동체 후방의 재순환영역에서 발생하는 *k*값의 증감에 따라 변화함을 확인했다. 결과적으로 두 변수의 변화는 결국 LEBU로 인해 난류 특성이 변화하는 것과 직접적인 연관이 있음을 확인할 수 있었다.

수중운동체의 저항을 저감할 수 있는 LEBU의 위치는 존재하지만, 특정 *Re* 영역을 유지해야 하며, 특히 3차원 배치를 고려하는 경우 LEBU와 수중운동체 사이를 지지하는 구조물을 설치하고 완벽하게 고정시키는 것은 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 지지구조물을 고려한 계산이 되지 않았으므로, 지지구조물이 저항에 미치는 영향을 고려하는 경우 저항 저감 효과를 기대하기 어려울 수도 있다. 3차원 형상을 고려한 LEBU와 수중운동체의 저항 변화에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

현실적으로 LEBU를 통한 저항 저감 효과를 달성하기 어렵지만, 경계 외층의 난류를 조절함으로써 물체의 $\overline{C_f}$ 및 $\overline{C_p}$를 조절할 수 있다는 점에서 여전히 연구가치가 있다. 과거에는 LEBU 후방에서의 $\overline{C_f}$ 감소 효과 및 그 이유를 분석하는 연구가 중심이었으나, 본 연구는 LEBU로 인한 $\overline{C_p}$ 변화 및 이유를 분석해야 할 필요가 있음을 이야기하고 있다. 또한 LEBU에서 후방으로 멀리 떨어진 지역에서는 난류 특성이 기존보다 강화되었다는 점에서 이를 이해하기 위한 난류 구조적 관점에서의 연구를 추가적으로 진행할 필요가 있다. 이와 같이 LEBU에 대한 연구가 활발히 이루어진다면 LEBU를 통한 전체 저항 감소는 충분한 가능성이 있을 수 있다.

References

[1] J. Kim, “Physics and Control of Wall Turbulence for Drag Reduction,” Philos. Trans. R. Soc., A 369, 1396-1411, 2011.

[2] T. C. Corke, Y. Guezennec, and H. M. Nagib, “Modification in Drag of Turbulent Boundary Layers Resulting from Manipulation of Large-Scale Structures,” NASA-CR-3444, 1981.

[3] A. M. Savill and J. C. Mumford, “Manipulation of Turbulent Boundary Layers by Outer-Layer Devices: Skin-Friction and Flow-Visualization Results,” J. Fluid Mech. 191, 389-418, 1988.

[4] A. Sahlin, A. V. Johansson, and P. H. Alfredsson, “The Possibility of Drag Reduction by Outer Layer Manipulators in Turbulent Boundary Layers,” Phys. Fluids 31, 2814, 1988.

[5] C. Chin, R. Őrlű, J. P. Monty, N. Hutchins, A. Ooi, and P. Schlatter, “Simulation of a Large-Eddy-Break-Up Device(LEBU) in a Moderate Reynolds Number Turbulent Boundary Layer,” Flow, Turbul. Combust. 98, 445-460, 2017.

[6] J. Kim, P. Moin, and R. Moser, “Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds Number,” J. Fluid Mech. 177, 133-166, 1987.

[7] K. Fukagata, K. Iwamoto, and N. Kasagi, “Contribution of Reynolds Stress Distribution to the Skin Friction in Wall-Bounded Flows,” Phys. Fluids 14(11), L73-L76, 2002.

[8] M. Yoon, J. Ahn, J. Hwang, and H. J. Sung, “Contribution of Velocity-Vorticity Correlations to the Frictional Drag in Wall-Bounded Turbulent Flows,” Phys. Fluids 28, 081702, 2016.

[9] J. -S. Kim, J. Hwang, M. Yoon, J. Ahn, and H. J. Sung, “Influence of a Large-Eddy Breakup Device on the Frictional Drag in a Turbulent Boundary Layer,” Phys. Fluids 29(6), 065103, 2017.

[10] Y. F. Yao and N. D. Sandham, “Direct Numerical Simulation of Turbulent Trailing-Edge Flow with Base Flow Control,” AIAA Journal, 40(9), 1708-1716, 2002.

[11] M. -J. Kim and K. -C. Lee, “Drag Prediction of an Axisymmetric Underwater Vehicle with Bluff Afterbody using CFD,” KIMST Annual Conference Proceedings, 2009.