경계층 외부 수직날의 마찰저항 저감 기구에 대한 PIV 관측

박현* · 안남현** · 박성현*** · 전호환**** · 이인원†

PIV Investigation on the Skin Friction Reduction Mechanism of Outer-layer Vertical Blades

Hyun Park, Nam Hyun An, Seong Hyoen Park, Ho Hwan Chun and Inwon Lee

Abstract. An experimental assessment has been made of the drag reducing efficiency of the outer-layer vertical blades, which were first devised by Hutchins¹⁾. The drag reduction efficiency of the blades was reported to reach as much as 30%. However, the drag reduction efficiency was quantified only in terms of the reduction in the local skin-friction coefficient. In the present study, a series of drag force measurements in towing tank has been performed toward the assessments of the total drag reduction efficiency of the outer-layer vertical blades. A maximum 9.6% of reduction of total drag was achieved. The scale of blade geometry is found to be weakly correlated with outer variable of boundary layer. In addition, detailed flow field measurements have been performed using 2-D time resolved PIV with a view to enabling the identification of drag reduction mechanism.

Key Words: drag reduction(저항저감), outer-layer vertical blades(외부경계층 수직 날), turbulent flow control(난류유동제어), time-resolved PIV(시간 분해 입자영상유속계), energy efficient ship(에너지 고효율 선박)

기호설명

C_f : 국소마찰저항계수($C_f = 2\tau_w/\rho U_m^2$)

C_F : 마찰항력계수($C_F = 2F_D/\rho U_m^2 S$)

h : 수직 날 높이

z : 수직 날 횡방향 간격

U_m : 유량평균유속($U_m = Q/A$)

u_τ : 마찰속도($u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$)

δ : 경계층두께

1. 서 론

마찰저항 저감은 선박의 연료효율 증대에 있어서 가

장 중요한 문제이다. 현대적인 선형최적화 기술의 적용으로 선박 총저항에 있어서 조파저항의 비중은 20% 이하를 유지하고 있다. 따라서, 나머지 부분을 차지하는 마찰저항 저감으로 얻을 수 있는 경제적 잠재력은 엄청나다. 일례로서, 2003년 의 전세계 해운산업의 연료소모량은 21억 배럴로 추산되는데²⁾, 금액으로는 매년 2000억 달러에 해당된다. 선박의 마찰저항을 10% 저감할 수 있다면 전 세계적으로 매년 160억 달러의 연료비를 절약할 수 있다.

난류유동의 마찰저항은 유동의 조직구조(coherent structure), 예를 들면 머리핀 와류 등과 밀접한 관계가 있다. 조직구조를 파괴 혹은 억제함으로써 마찰저항을 저감하는 다양한 방법이 제안되었는데, 제어동력의 유무에 따라 수동적 기법과 능동적 기법으로 대별된다.

신뢰성 및 경제성 측면에서 선박 응용에 적합한 기법은 수동기법으로 여겨지는데, 여기에는 riblet^{3,4)}, 유연벽면⁵⁾, LEBU(Large Eddy BreakUp device)⁶⁾ 등이 있다. Hefner et al.⁶⁾은 LEBU를 설치하여 미설치한 평균 경계층 대비 벽면마찰저항이 국부적으로 24% 줄어

†부산대학교 첨단조선공학연구센터

E-mail : imwon@pusan.ac.kr

*부산대학교 첨단조선공학연구센터

**거제대학 조선과

***부산대학교 조선해양공학과 대학원

****부산대학교 첨단조선공학연구센터

드는 결과를 얻었다. LEBU는 대형 와 구조와 직접적으로 상호작용하여 난류에너지의 생성을 방해하고 마찰저항의 대부분을 유발하는 난류 파열(turbulent burst)의 강도 및 횡수를 감소시킨다.

한편, 최근 Hutchins¹⁾는 경계층 내에 세워진 얇은 수직 날 배열을 고안하였다. 수직 날 배열은 조직구조를 잘게 썰어서 외부구조와 내부구조 사이의 연계를 방해한다. 수직 날의 높이와 횡방향 간격을 변화하면서 최적 형상을 탐색했는데 국부 마찰저항이 최대 30%까지 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 이 결과는 수직 날의 후방에서 측정된 국부적인 마찰저항의 저감만을 보여주고 있기 때문에 실제 선박 응용성을 보장하는 것은 아니다. 수직 날 때문에 일어나는 모멘텀 결핍에 의한 자체항력은 조사된 바 없다. 실제로 LEBU의 경우는 벽면에서 감소된 마찰항력보다 자체항력이 크기 때문에 실용성이 크게 떨어진다. 결국, 수직 날 배열을 장착했을 때 전체항력의 감소 여부가 확인되어야 한다.

본 연구는 전체항력의 감소여부를 확인하기 위하여 평판에 수직 날 배열을 부착하고 예인수조에서 총 저항을 측정하였다. 또한 수직 날 배열의 마찰저항 저감 기구를 규명하기 위하여 회류수조 내에서 2차원 시간분해 입자영상유속계(2-D time-resolved PIV)를 이용하여 비정상 난류 조직구조의 변화 양상을 비교 관측한다.

2. 예인수조에서의 총저항 저감 확인

2.1 유동조건 및 수직 날 형상

예인수조 시험에서 사용된 평판의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 평판의 크기는 길이 730 mm, 높이 200 mm, 두께 8 mm이고 한쪽 면에는 폭 3 mm의 홈이 3개 가공되어 있어서 수직 날 배열을 부착할 수 있다. 평판 앞날(leading edge)은 종횡비 6:1의 타원 단면으로 가공되었고 앞날의 바로 뒤에는 난류 촉진장치(turbulent trip)로 기능하는 220번 사포의 띠가 부착되어 있다.

수직 날 장착 위치($x = 0.36$ m)에서의 경계층 두께는 $\frac{\delta U_\infty}{\nu} = 0.14 \frac{Re_x}{\ln Re_x} G(\ln Re_x)^{7/4}$ 을 경계층 가장 원점 $Re_x = 1.5 \times 10^5$ 및 $G(\ln Re_x) = 1.5$ 을 사용하여 추정된다. 이 위치에서 수직 날을 부착하지 않은 경우의 국부 마찰계수는 White⁸⁾의 경험식 $C_{fx} = 0.455 / \{\ln(0.06 Re_x)\}^2$ 을 사용한다.

Fig. 1. Schematic diagram of flat plate.

Fig. 2. Blade geometry and naming convention.

수직 날 배열은 두께 0.2 mm의 얇은 스테인레스 스틸 판을 직사각형으로 잘라 조립하였다. 수직 날의 형태 및 형상 변수의 명칭을 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서는 수직 날의 높이 h 를 여섯 가지(1.0 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm), 횡방향 간격 z 를 3가지(2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm)로 변화시킨 18가지 조합에 대하여 마찰저항을 계측하였다. 이와 같은 형상변수를 무차원화하는 방법에는 경계층 두께 δ 를 사용하는 외부축척(outer scaling), 마찰속도 u_τ 및 점성계수 ν 에 의한 내부축척(inner scaling)이 있다. 수직 날 높이 h 가 다르더라도 무차원화 방법에 따라 무차원높이 h/δ 는 비슷한 값이 될 수 있다. 예를 들어 $h = 2$ mm, $U_\infty = 1.0$ m/s 일 때 $h/\delta = 0.852$ 인 데 비하여 $h = 4$ mm, $U_\infty = 3.0$ m/s 일 때 $h/\delta = 0.868$ 을 얻는다. 반면, 내부축척을 사용하면 위의 두 경우는 각각 $h^+ = 94$ 및 $h^+ = 405$ 로서 큰 차이가 난다. 즉, 본 실험의 조건들은 저항저감의 기구를 지배하는 변수는 외부변수와 내부변수 중 어느 쪽인가를 판단하기 위하여 의도적으로 설정된 것이다.

2.2 예인수조 저항측정 방법

본 실험은 부산대학교 예인수조에서 수행되었는데, 예인수조의 제원은 길이 100 m, 폭 8 m, 수심 3.5 m 이다. Fig. 1에 도시된 수직 날이 부착된 평판을 예인전차에 부착, 예인될 때의 총저항을 측정하는데, 예인속도는 2.52~3.54 m/s의 범위에서 변화된다($Re = 1.42 \times 10^6 \sim 2.00 \times 10^6$). 수직 날이 장착되지 않은 평판의 저항을 먼저 측정한다. 예인수조에서 측정되는 총 저항에는 조파저항 성분이 포함되는데, 본 연구에서는 Schultz⁹⁾의 방법을 사용하였다. 이 방법은 조파저항이 물 속에 잠긴 면적과는 무관하게 수선 단면의 형상에만 의존한다는 가정에 근거한다. 평판이 물에 잠긴 깊이인 흘수를 13, 137, 150 mm로 바꾸면서 총 저항을 측정하여 아래 식과 같이 조파저항을 구한다. 이렇게 구해진 조파저항 값을 총저항에서 빼 줌으로써 마찰저항을 구할 수 있다.

137 mm 총저항 = 137 mm 면적 × 마찰저항계수 + 조파저항

13 mm 총저항 = 13 mm 면적 × 마찰저항계수 + 조파저항

150 mm 총저항 = 150 mm 면적 × 마찰저항계수 + 조파저항

137 mm 총저항 + 13 mm 총저항 - 150 mm 총저항 =
(137 mm 면적 + 13 mm 면적) × 마찰저항계수 + 2 조파저항 -
150 mm 면적 × 마찰저항계수 - 조파저항 = 조파저항

2.3 총 저항 계측 결과

예인수조 실험에서 측정된 마찰항력을 마찰항력계수 $C_F = \frac{2F_D}{\rho U_\infty^2 S}$ 로 무차원화하였는데, 여기에서 F_D 및 S 는 각각 마찰항력 및 평판의 침수표면적이다. 수직 날이 부착되지 않은 경우의 마찰항력계수는 두께 0 인 매끈한 평판에 대한 Scheonherr의 경험식 $\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(Re_L \cdot C_F)$ 보다 약 20% 정도 크게 나타나고 있는데 이는 수직 날을 부착하기 위한 홈을 평판에 내기 위하여 평판의 두께가 8 mm이기 때문으로 분석된다. Fig. 3은 수직 날이 부착된 18가지의 경우의 마찰항력계수를 수직 날이 부착되지 않은 경우와 비교한 것이다. 마찰항력계수는 수직 날을 부착하지 않은 경우 대비 최대 9.6% 감소하는 반면, 최대 7.5% 증가하는 경우도 관측된다.

Fig. 3. Skin-frictional drag coefficient versus Reynolds number for flat plate with blade condition.

3. 마찰저항 저감기구의 PIV 관측

3.1 실험장치 및 시험부

수직 날 주위 유동의 난류유동구조를 관측한 실험은 Fig. 4의 회류수조에서 수행되었다. 회류수조의 시험부는 2차원 채널이며 단면의 크기는 폭 0.4 m, 높이 0.16 m이다. 시험부 내의 채널유동은 모터에 연결된 원심펌프에 의하여 구동되며 유속은 인버터를 이용하여 모터의 회전수를 제어함으로써 조절된다. 시험부를 흘러가는 유량을 측정하기 위하여 자기유량계를 설치하였다. 본 실험에서 시험부 단면을 흐르는 체적유량을 단면적으로 나누어 구해지는 유량평균유속 U_m 은 약 0.5 m/s로 유지되었다. Fig. 5는 회류수조 시험부 벽면에 설치된 수직 날 배열을 나타내고 있는데, 수직 날의 높이 h 는 20 mm, 수직 날 간격 z 는 12 mm 이다. 이는 무차원 높이 $h/\delta = 0.312$ ($h^+ = 393$) 및 무차원 간격 $z/\delta = 0.187$ ($z^+ = 236$) 에 해당한다.

Fig. 4. Schematic diagram of the circulating water tunnel.

Fig. 5. Vertical blades array installed in the test section.

본 연구에서 사용된 2차원 시간분해 입자영상유속계는 Dantec Dynamic 사 제품으로 고속 Nd:YAG 레이저, 고속 CMOS 카메라 등으로 구성된다. 레이저는 Lee 사의 다이오드 펌프형 Nd:YAG 레이저(LDP-100MQG)로서 출력 파장 532 nm, 에너지 11mJ의 레이저 펄스를 10~20,000 Hz의 주파수로 발생할 수 있다. 고속 카메라는 10비트 해상도의 NanoSense Mk.III 인데 화소 수 1,280×1,024에서 초당 최대 1,040 프레임의 영상을 찍을 수 있다. 산란입자는 직경 10 μm의 중공 유리입자(hollow glass bead)를 사용하였다.

2차원 입자영상유속계의 측정영역은 xy 평면과 xz 평면의 두 가지 평면에 구성되었다. 여기에서 x는 흐름방향, y는 벽면에 수직인 방향, z는 횡방향이다. 먼저 xy평면에서는 Fig. 6에 도시한 것처럼 수직 날 평면(z = 0 mm) 및 수직 날 중간 평면(z = 6 mm)으로 나누어 각각 $0 \leq x/h \leq 32$ 의 영역에서 측정을 수행하였다. x = 0 지점은 수직 날의 뒷날(trailing edge)에 해당한다. 측정을 수직 날 평면(z = 0 mm) 및 수직 날 중간 평면(z = 6 mm)으로 나누는 이유는 수직 날의 존재로 인하여 유동에 상당한 정도의 3차원성이 존재하기 때문이다. xz 평면 또한 벽면으로부터의 거리 y를 1, 4, 9 mm로 바뀌가면서 $0 \leq x/h \leq 32$ 의 영역에서 측정이 이루어졌다. 이들 높이는 각각 $y^+ \sim 25, 100$ 및 220에 해당하여 채널 유동의 완충층(buffer layer) 및 중첩층(overlap layer) 내의 유동을 위에서 내려다본 결과를 얻게 된다. Fig. 6에 나타난 사각형 영역이 PIV의 관측영역(field of view)가 되며 대략 4h 정도의 거리에 해당한다. 즉, $0 \leq x/h \leq 32$ 의 영역을 4h 씩 8개로 나누어 측정이 수행되었다.

Fig. 6. PIV measurement domain.

Fig. 7. Streamwise development of local skin friction coefficient.

3.2 PIV 측정결과

xy 평면에서의 PIV 측정에서 x방향 평균유속을 벽으로부터의 거리 y의 함수로서 얻을 수 있는데, 이로부터 벽면마찰응력 τ_w 및 마찰속도 $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ 를 계산할 수 있다. 수직 날이 장착된 경우 마찰응력 τ_w 는 흐름방향 좌표 x에 따라 달라지는데 무차원 국소마찰저항계수 $C_f(x) = \tau_w(X)/0.5\rho U_m^2$ 의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 앞서 언급한 유동의 횡방향 3차원성에 의하여 국소마찰저항계수는 x뿐만 아니라 횡방향 좌표 z에 따라서도 달라지는 경향을 볼 수 있다. 수직 날 바로 뒤인 Z00 평면과 수직 날 사이 평면인 Z06 평면에서의 국소마찰저항계수의 분포는 상관관계수 -0.43인 음의 상관관계를 보이고 있다. 수직 날이 장착되지 않은 채널유동(Fig. 7의 baseline) 대비 Z00 평면에서는 평균 2.73%, Z06 평면에서는 평균 7.95% 마찰저항이 감소되는 것으로 나타났다. Z00 평면은 수직 날 바로 뒤에 존재하기 때문에 모멘텀 결핍(momentum deficit)

Fig. 8. Mean velocity profiles measured in Z00 plane; (a) dimensional plot, (b) nondimensional plot.

Fig. 9. Mean velocity profiles measured in Z06 plane; (a) dimensional plot, (b) nondimensional plot.

이 존재하는 반면, Z06 평면에서는 수직 날 사이의 공간으로 유동이 빠져나가 그러한 유속의 결핍이 나타나지 않는다. 주목할 만한 사실은 Z06 평면의 경우 유동이 Z00 평면보다 빠르면서도 불규칙하고 평균적으로 마찰저항은 더 작다는 것이다. 이는 Z06 평면과 같이 수직 날 사이의 공간에서 난류 조직구조의 활동이 더욱 잘 억제됨을 시사한다.

Fig. 8 및 9는 각각 Z00 및 Z06 평면에서 측정된 평균유속 분포를 보여주고 있다. 수직 날이 위치한 Z00 평면에서는 수직 날 후류로 인하여 $y = 20 \text{ mm}$ 부근에서 평균유속이 줄어드는 현상이 관찰된다. 반면 수직 날 사이의 평면인 Z06 평면에서는 후류가 관찰되지 않는다.

난류강도의 분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 도시하였다. Z00 평면에서는 수직 날 직후 $x/h = 0.50$, $y/h \leq 1.0$ 인 영역에서 흐름방향 난류강도 $\sqrt{u'^2}/U_m$ 가 수직 날이 없는 경우보다 커지는데, 이는 수직 날 후류의 와류에 의한 것이다. 그러나 수직 날에 의하여 야기된 난류에너지의 증가는 이후의 하류 영역에서 지속되지 않으며 흐름방향 난류강도는 수직 날이 없는 경우보다 약간 작아진다. 마찬가지로 Z06 평면에서도 흐름방향 난류강도는 전반적으로 기준 경우보다 작아진다. 수직 방향 난류강도 $\sqrt{v'^2}/U_m$ (Fig. 10(b), Fig. 11(b)) 또한

Fig. 10. Turbulence intensity profiles in Z00 plane; (a) $\sqrt{u'^2}/U_m$, (b) $\sqrt{v'^2}/U_m$, (c) $-\overline{u'v'}/U_m^2$

Fig. 11. Turbulence intensity profiles in Z06 plane; (a) $\sqrt{u'^2}/U_m$, (b) $\sqrt{v'^2}/U_m$, (c) $-\overline{u'v'}/U_m^2$

수직 날이 없는 기준 경우보다 작아지는데, 그 차이는 흐름방향 난류강도의 차이보다 더욱 두드러진다. Fig. 10(c) 및 Fig. 11(c)에 주어진 Reynolds 응력은 기본 경우보다 훨씬 감소하는데, 그 양상은 횡방향 위치에 따라 달라진다. Z00 평면에서는 $y/h = 1.0$ 부근에서 Reynolds 응력이 최대값을 갖는 반면, Z06 평면에서는 최소값을 보인다. 난류강도 특히 Reynolds 응력의 전반적인 감소는 난류구조의 약화를 의미하며 마찰저항 저감 현상을 뒷받침한다.

난류강도 및 Reynolds 응력의 감소에서 예상되는 난류구조의 변화를 조사하기 위하여 xy 평면에서의 순간 속도벡터 및 횡방향 와도의 등고선도를 Fig. 12에 수직 날이 없는 기준경우와 수직 날이 설치된 Z06 평면의 경우를 비교하여 나타내었다. xy 평면의 순간속도 벡터에서 확인될 수 있는 난류구조는 머리핀 와류의 머리 부분의 횡방향 와도, 분출/쓸림(ejection/sweep) 및 전단층 등이다. Fig. 12에서는 주유동과 함께 하류 방향으로 대류되는 난류구조를 나타내기 위하여 흐름 방향 속도성분에서 유량평균유속 U_m 을 뺀 순간속도장

Fig. 12. Vector plot and spanwise vorticity plot in xy-plane; (a) without blade, (b) with blade (Z06 plane).

을 도시하였다. Fig. 12(a)에 나타난 기준 경우에서의 순간속도장은 위에서 언급한 난류유동장의 특성을 잘 나타내고 있다. 한편, Fig. 12(b)에 도시된 수직 날이 설치된 경우에서도 ejection 및 전단층과 같은 난류구조가 명확히 발견된다. 즉, 수직 날이 설치되어도 xy 평면상 난류구조는 본질적인 변화가 없다.

Fig. 13~15에는 유동장을 위에서 내려다본 xz 평면 상에서의 순간유동장을 보이고 있는데 (u, w) 속도벡터와 함께 흐름방향 속도의 변동인 u' 의 등고선도를 나타내었다.

특히 u' 의 등고선도로부터 벽 근처 난류유동의 특징적 구조인 흐름방향 고속/저속띠무늬(high/low speed streak)를 쉽게 관찰할 수 있다. PIV의 측정평면을 xz 평면으로 할 때 벽면으로부터의 높이 y를 바꿈으로써 난류유동의 개별적인 층에서의 유동 구조를 조사할 수 있다.

Fig. 13. Vector plot and contour plot of streamwise velocity fluctuation in xz -plane at $y = 1 \text{ mm}$ ($y^+ = 25$); (a) without blade, (b) with blade (Z06 plane).

Fig. 13은 $y = 1 \text{ mm}$ ($y^+ = 25$)에서 측정된 결과로서 측정평면의 위치는 내부층(inner layer) 중의 완충층(buffer layer)에 해당된다. Fig. 13(a)의 기준경우에서는 적색과 청색의 흐름방향 고속/저속 띠무늬가 군데 군데 분포하는 모습은 벽면 근방 난류유동의 특성을 잘 나타내고 있다. 한편 수직 날이 설치된 경우인 Fig. 13(b)는 일부 위치에서 저속 띠무늬가 흐름방향으로 길게 이어지기는 하지만 크기와 간격 등에 있어서 전반적으로 Fig. 13(a)와 큰 차이가 발견되지 않는다. 이로부터 수직 날이 설치되어도 벽면 근방 내부층의 난류구조에는 본질적인 변화가 야기되지 않는 것으로 분석된다. 본 연구에서 조사된 수직 날의 간격 $z/\delta = 0.187$ ($z^+ = 236$)이 벽면 근방의 띠무늬 구조(near-wall streaky structure)의 간격인 $d^+ = 100$ 보다 훨씬 크기 때문에 내부층의 난류를 억제하는 효과는 없는 것으로

Fig. 14. Vector plot and contour plot of streamwise velocity fluctuation in xz -plane at $y = 4 \text{ mm}$ ($y^+ = 100$); (a) without blade, (b) with blade (Z06 plane).

판단된다. 일례로, 내부층의 난류를 억제하는 대표적인 방법인 리블렛의 경우 횡방향 간격이 $s^+ < 30$ 을 만족하여야 한다.

PIV 측정 평면을 보다 바깥쪽으로 움직여서 로그층에 해당되는 $y = 4 \text{ mm}$ ($y^+ = 100$) 인 경우를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14(a)의 기준경우를 보면 띠무늬 구조의 길이 및 폭이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 외부층에서의 난류조직구조가 공간적으로 분산된 개별적인 머리핀 와류가 아니라 흐름방향으로 연결되어 여러 개의 머리핀 와류가 함께 이동하는 폐지은 다발 구조(nested packet structure)로 형성된다는 Adrian et al.¹⁰⁾의 관찰 결과와도 상통한다. 따라서 머리핀 와류의 집단에 의한 띠무늬 구조의 흐름방향 길이 및 횡방향 폭이 증가함을 알 수 있다. 반면, 수직 날이 설치된 Fig. 14(b)의 경우는 내부층에서의 관측결과인 Fig.

Fig. 15. Vector plot and contour plot of streamwise velocity fluctuation in xz -plane at $y = 9 \text{ mm}$ ($y^+ = 220$); (a) without blade, (b) with blade (Z06 plane).

13(b)와 유사함을 알 수 있다. 이는 수직 날에 의하여 외부층에서의 조직구조의 크기 성장이 방해받음을 의미한다.

수직 날에 의한 조직구조의 성장 억제는 $y = 9 \text{ mm}$ ($y^+ = 220$) 에서 관측된 Fig. 15에서도 명백히 드러난다. Fig. 15(a)의 기준경우에서는 띠무늬구조의 길이 및 폭의 증가와 함께 상당한 수준의 횡방향 속도 성분이 관찰된다. 그러나 Fig. 15(b)에서는 띠무늬 구조의 크기가 작아짐은 물론, 횡방향의 속도가 거의 나타나지 않고 있다. 결론적으로, 본 연구에서 조사된 외부경계층 수직 날 배열은 외부층의 난류구조의 성장을 억제하는데, 주된 기구는 조직구조를 잘라내고 외부층에서의 횡방향 모멘텀 교환을 방해하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 Hutchins¹⁾에 의하여 최초로 제안된외부경계층 수직 날에 대한 총저항저감성능 및 마찰저항 저감 기구에 대한 실험적 평가를 수행하였다. 평판에 수직 날을 부착하고 예인수조에서 항력을 측정한 실험에서 최대 9.6%의 총저항 저감효과를 확인하였다. 이어지는 회류수조에서의 시간분해 PIV 계측을 통하여 수직 날에 의한 난류유동의 변화를 실시간으로 계측하였다. 그 결과 수직 날에 의하여 외부층에서의 조직구조의 성장 및 횡방향 모멘텀 교환이 억제됨을 관찰하였고 이것이 난류량의 감소 및 마찰저항 저감의 원인이 됨을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Hutchins, N., 2003, An investigation of larger-scale coherent structures in fully developed turbulent boundary layers, Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
- 2) Corbett, J. J. and Koehler, H. W., 2003, "Updated emissions from ocean shipping," J. Geophysical Research, vol. 108, no. D20, pp. ACH 9-1 ~ 9.13.
- 3) Walsh, M., 1980, "Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets, In: Viscous Flow Drag Reduction (ed. G. R. Hough)," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 72. AIAA.
- 4) Beckert, D. W. and Bartenwerfer, M., 1989, "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs," J. Fluid Mechanics, Vol. 206, pp.105-129.
- 5) Choi, K. S., Yang, X., Clayton, B. R., Glover, E. J., Atlar, M., Semenov, B. N. and Kulik, V. M., 1997, "Turbulent drag reduction using compliant surfaces," Proc. Royal Soc. London ser. A, Vol.453, pp. 2229-2240.
- 6) Hefner, J. N., Weinstein, L. M. and Bushnell, D. M., 1979, "Large-Eddy Breakup Scheme for Turbulent Viscous Drag Reduction," Paper of the Symposium

- on Viscous Drag Reduction, Nov. 7-8.
- 7) Schlichting, H. and Gersten, K., 2000, "Boundary Layer Theory," 8th Ed., Springer-Verlag, Berlin, p. 34.
- 8) White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow," 2nd Ed., McGraw Hill, p. 432.
- 9) Schultz, M. P., 2004, "Frictional Resistance of Anti-fouling Coating System," Trans. ASME J. Fluid Eng., Vol. 126, pp. 1039-1046.
- 10) Adrian, R. J., Meinhart, C. D. and Tomkins, C. D., 2000, "Vortex organization in the turbulent boundary layer," J. Fluid Mech., Vol. 422, pp.1-54.