

반구 전방에 생성된 말굽와류 흡입제어에 의한 후류영역 마찰저항 감소에 관한 연구

구본국* · 강용덕**†

* 창원대학교 조선해양공학과, ** 동의대학교 조선해양공학과

Skin-Friction Drag Reduction in Wake Region by Suction Control on Horseshoe Vortex in front of Hemisphere

Bonguk Koo* · Yong-Duck Kang**†

* Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon University, Changwon, Korea

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

요 약 : 층류 경계층 내 반구에 의해 유기되는 말굽와류를 흡입 제어했을 때 후류영역에서의 마찰저항 변화를 측정하였다. 이를 위해 회류수조에서 유동가시화를 실시하여 최적의 자유유속, 반구 크기 및 흡입제어 구멍 크기를 결정하였고, 반구 후류영역에 설치된 평판과 연결된 동력계로 표면 마찰저항 감소를 측정하는 실험을 수행하였다. 평판에 설치된 반구 전방에는 유입 유동에 의해 반구를 감싸는 말굽와류가 생성되며 그 주위 와도 방향에 의해 후류영역으로는 빠른 유속의 유동이 유입되어 머리핀 와류 생성을 촉진시킨다. 따라서 반구 전방에 생성되는 말굽와류 세기를 흡입 제어에 의해 약화시킴으로써 반구 좌우측으로 길게 형성된 유속방향 와류가 후류영역으로 공급하는 에너지는 감소하게 된다. 즉, 반구 전방의 말굽와류를 제어함으로써 후류영역으로부터 생성되는 헤어핀 와류 발생 주파수가 줄어들게 된다. 염료 주입을 이용한 유동 가시화 영상을 해석한 결과로 머리핀 와류의 발생 빈도가 흡입제어에 의해 36.4% 감소되었고, 후류영역에서 측정된 표면 마찰저항은 2.3% 감소되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 말굽와류, 벽면 흡입제어, 머리핀 와류, 와류 발생 주파수, 표면 마찰저항, 동력계

Abstract : The aim of this study was to investigate the possibility of the skin-friction reduction by vortex control. A vortical system such as a horseshoe vortex, a hairpin vortex, and a wake region was induced around a hemisphere attached on a Perspex flat plate in the circulating water channel. Hairpin vortices were developed from the wake region and horseshoe vortices were formed by an adverse pressure gradient in front of the hemisphere. The horseshoe vortices located on the flank of the hemisphere induced a high momentum flow in the wake region by the direction of their vorticity. This process increased the frequency of the hairpin vortices as well as the frictional drag on the surface of the wake region. To reduce the skin-friction drag, suction control in front of the hemisphere was applied through a hole. Flow visualization was performed to optimize the free-stream velocity, size of the hemisphere, and size of the suction hole. Once the wall suction control mitigated the strength of the horseshoe vortex, the energy supplied to the wake region was reduced, causing the frequency of the hairpin vortex generation to decrease by 36.4%. In addition, the change in the skin-friction drag, which was measured with a dynamometer connected to a plate in the wake region, also decreased by 2.3%.

Key Words : Horseshoe vortex, Wall suction control, Hairpin vortex, Shedding frequency, Skin-friction drag, Dynamometer

1. 서 론

경계층 내 표면에서 생성되는 와류들은 상호작용을 통해

난류 에너지를 지속적으로 공급하여 난류 흐름을 유지한다. 이러한 에너지 전달과정은 난류 구조물이 주기적으로 생성될 수 있도록 폭발(Bursting) 과정이 주원인이라는 것을 유동가시화(Kline et al., 1967; Schlichting, 1968)를 통해 밝히고 있다. 특히, 난류 구조물 상호간의 간섭으로 불안정하게 진동하고 폭발하면서 동반하는 쓸림(Sweep) 현상은 표면으로 빠

* First Author : bonguk9@changwon.ac.kr, 055-213-3685

† Corresponding Author : ydkang@deu.ac.kr, 051-890-2815

른 유동을 유입시켜 마찰저항을 증가시킨다. 이에 대응하기 위한 다양한 제어방법인 전자기힘, 플라즈마, 리블렛, 흡입/뿔음 등을 적용하여 표면 근처에 머무르는 와류 생성을 억제하여 성장을 방해하였다. 그러나, 표면에 머무르는 와류를 제어함으로써 마찰저항을 감소시키는데에는 한계가 있다. 수치모델링 해석(Abe et al., 2001; Iwamoto et al., 2002)은 레이놀즈수가 증가할수록 표면근처에 생성되는 와류뿐만 아니라 경계층 근방에 이르는 큰 규모 와류의 역할이 증가함을 보였다.

경계층 내 유동이 우측에서 좌측으로 이동하면서 Fig. 1(a)에 보인 것처럼 표면에는 횡방향 와류가 형성되고, 폭발(Bursting) 현상으로 횡방향 와류는 Fig. 1(b)와 같이 변형된다. 이때 Fig. 1(c)의 적색 화살표로 표시된 쓸림(Sweep) 현상은 고속의 유동을 표면으로 유입시켜 저속의 유동을 외부영역으로 밀어내는 분출(Ejection) 현상(청색 화살표)을 유발시킨다. 이렇게 생성된 머리핀 와류의 머리 부분은 Fig. 1(d)와 같이 경계층 두께까지 성장해 나가고 다리부분은 표면에 머무르며 표면 마찰저항을 증가시킨다. 즉, 머리핀 와류 내부에서는 저속의 유동이 표면으로부터 경계층 외부로 끌어올려지는 반면, 외부에서는 와류 순환 방향에 의해 상대적으로 고속의 유동이 표면으로 유입되어 마찰저항이 증가하게 된다(Robinson, 1990; Doligalski et al., 1994).

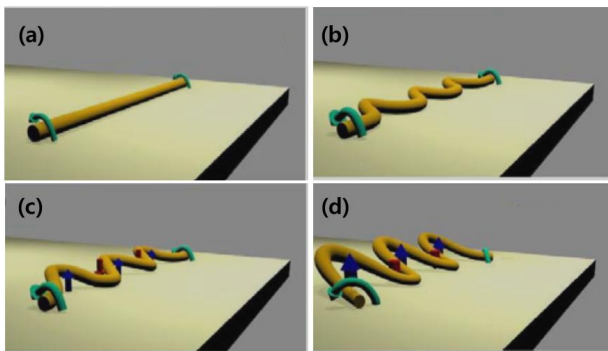


Fig. 1. The initiation of hairpin vortices on the wall. (a) The spanwise vortex with the vorticity (green arrow); (b) The burst events make the spanwise vortex wiggling by sweep motions; (c) Sweep motions (red arrow) cause ejection events (blue arrow); (d) Hairpin vortices grow to reach the boundary layer thickness.

경계층 내부에 Large Eddy Break Up devices, LEBUs (Balakumar and Widnall, 1986; Guezennec and Nagib, 1990) 혹은 수직평판(Hutchins and Choi, 2002)을 설치하여 머리핀 와류의 머리 혹은 어깨를 제어하여 마찰저항 감소의 극대화가 가능

함을 보였다. 머리핀 와류가 성장해 나가면서 구조물이 하류방향으로 잡아 당겨져 표면에서 지탱하는 다리 부분의 와류 직경이 작아짐에 따라 와도가 증가하여 빠른 유속이 표면으로 유입된다. 이러한 다리부분과 머리 부분의 연결을 끊어줌으로써 마찰저항 감소에 기여한다. 하지만, 설치된 구조물에 의한 자체 저항의 증가(Sahlin et al., 1988)로 순감소량은 레이놀즈수가 낮은 구간에서만 그 효과가 검증되었다.

다른 연구에서는 경계층 외부에 설치된 제트분사 장치(Kang et al., 2008)를 사용하여 선별적으로 머리핀 와류만 제어함으로써 표면마찰저항 감소가 있음을 보였다. 그렇지만, 제어장치에 의해 발생하는 후류 영향과 구조물 자체의 부가저항으로 난류 유동에서 머리핀 와류 제어 원리 및 연관성을 규명하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 머리핀 와류의 다리부분에 해당하는 유속방향의 말굽와류를 층류경계층 내 반구를 사용하여 생성하였고, 부가물의 영향이 없도록 벽면 구멍을 통해 흡입제어를 하였다. 먼저, 반구 내부로 염료를 주입시켜 반구 주위 와류시스템 및 후류영역을 가시화하였으며, 직경변화 및 자유유속 변화에 따른 유동 안정화를 점검하였다. 또한 흡입속도를 변화시켜 반구 후류의 머리핀 발생 주파수 변화량을 확인하였다. 동력계의 측정 오차범위를 벗어나 마찰저항 변화가 발생하는 반구의 크기를 선정하여 흡입 제어를 적용함으로써 마찰저항 변화를 측정하였다.

2. 실험 구성

2.1 회류수조

Fig. 2는 회류 수조의 측정영역에 설치된 평판 위 반구, 흡입제어 구멍 크기, 동력계, 염료통 및 연결 튜브를 보여준다. 회류 수조는 1.0m/s에서 ±2%의 속도분포로 2.0m/s까지 운용이 가능하다. 회류 수조의 전체 크기(L×W×H)는 12.5m×2.2m×5.8m이고, 유동가시화 및 동력계 측정을 위한 관측부의 크기는 2.5m×1.8m×0.9m이다. 균일류(Uniform flow)를 조성하기 위해 관측부 시작위치에 벌집모양(Honey comb)의 격자를 설치하였고, 실험에서 사용된 자유유속(U_∞)에 대한 난류 강도(Root Mean Square, RMS)는 1.17%로 계산되었다.

설치된 평판의 길이와 폭은 1.2m×1.8m이며, 0.6m의 뒷전 날개를 경첩으로 부착 후 각도를 12°로 고정하여 앞전에서 유동의 흐름이 매끄럽게 나뉘지도록 하였다. 평판은 불투명 아크릴로 제작하여 바닥으로부터 15cm 높이에 수평으로 설치되었다.

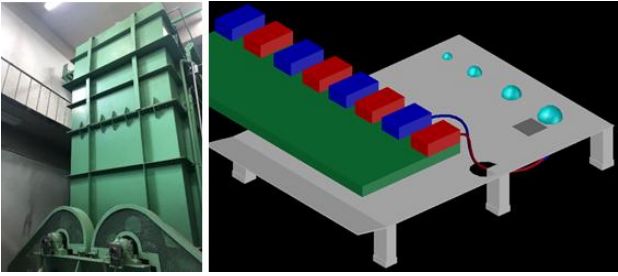


Fig. 2. The dye supply system and hemispheres on the test plate in the circulating water channel.

유동 가시화 실험에 사용된 반구의 재질은 플라스틱으로 직경(d)이 20mm, 30mm, 40mm 및 50mm의 반구를 실리콘으로 평판에 부착하였고, 마찰저항 측정 실험에는 직경이 50mm인 반구가 사용되었다. 자유 유속(U_∞)은 0.06m/s 및 0.08m/s로 앞전으로부터 반구 중심 위치($x=0.3m$)까지의 거리로 계산한 레이놀즈수(Re_x)는 1.8×10^4 및 2.4×10^4 이다.

$$Re_x = \frac{U_\infty \times x}{\nu} \quad (1)$$

여기서, ν 는 물의 동점성계수로 $1.01 \times 10^{-6} m^2/s$ 이다.

2.2 유동 가시화 시스템 및 흡입제어

경계층 내부에 설치된 반구 주위의 유동현상을 가시화하기 위해 적색염료를 반구 내부를 통해 반구표면으로 흘려보냈고, 청색염료는 반구 전방에 뚫은 구멍으로 주입시켰다.

Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 반구 중심위치의 평판에는 직경 5mm의 구멍을 뚫어 적색 염료 탱크에 튜브로 연결하여 후류영역 및 머리핀 와류를 관찰할 수 있게 하였다. 이를 위해 반구 표면에는 45°간격으로 직경 2mm 구멍 5개를 하류방향으로 향하게 하였다. 또한, 반구 전방 가장자리로부터 5mm 위치에 직경 4mm의 구멍을 뚫어 청색 염료를 주입하여 반구 주위를 감싸는 말굽 와류를 가시화 하였다. 청색 염료와 적색염료를 회류수조에 분사하는 유량은 일정시간 동안 배출된 염료 부피로 계산하였고, 실험동안 청색염료의 유량은 $13 cm^3/s$ 이고 적색염료의 유량은 $20 cm^3/s$ 였다. 유동 가시화 촬영은 3840×2160 pixel의 해상도와 30fps의 속도를 갖는 iPad Pro에 의해 기록되었으며, 이로부터 머리핀 와류 생성 주파수가 결정되었다.

흡입제어가 없는 경우에는 전방 구멍으로 청색염료를 흘려보냈지만 Fig. 3(b)와 같이 흡입제어를 실시하는 경우에는 염료대신 연결된 튜브를 회류수조 외부로 연결하고 중력에

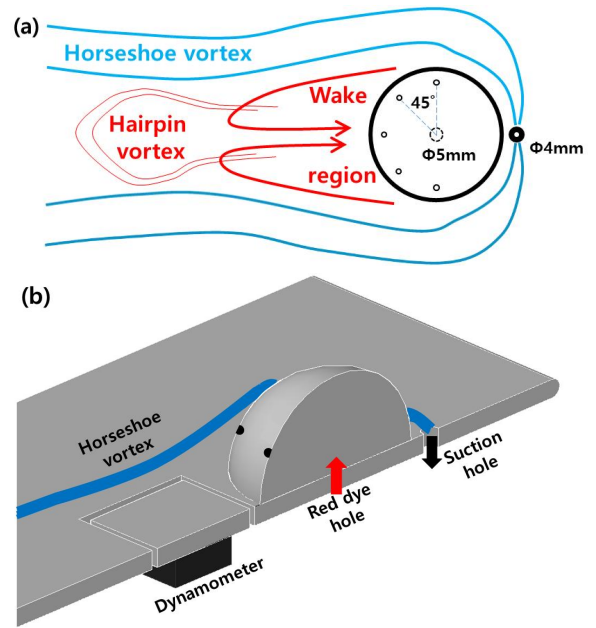


Fig. 3. Sketch of experimental configuration for measuring friction force. (a) Flow phenomena around a hemisphere with a dye system; (b) Flow control under the horseshoe vortex by wall suction and the measurement of skin-friction drag underneath the wake region.

의해 흡입 유량을 흘려보냈다. 반구 전방에 생성되는 말굽 와류의 와도를 감소시키는 흡입속도(V_{SUCK})는 용량 140ml 비이커를 채우는 시간을 측정하여 계산하였다. 흡입비(SR)로 정의된 흡입 강도는 흡입속도(V_{SUCK})와 자유유속(U_∞)의 비로 식(2)와 같이 계산된다.

$$Suction\ Ratio(SR) = \frac{(V_{SUCK})^2}{U_\infty^2} \quad (2)$$

말굽와류에 대한 흡입제어로 발생하는 마찰저항 변화는 자유 유속, 반구 직경 및 흡입비에 대한 매개변수를 변화시켰다. 즉, 직경이 다른 총 4개의 반구를 사용하였고 전방 흡입 구멍의 크기는 4mm 와 10mm가 사용되었으며 자유 유속은 $U_\infty = 0.06 m/s$ 와 $U_\infty = 0.08 m/s$ 가 사용되었다.

2.3 동력계 및 피토폴관

자유유속 측정을 위해 피토폴관을 사용하였고, 정압관과 동압관의 수두차 $h(m)$ 를 변경하면서 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 캘리브레이션을 진행하였다. 각 데이터는 100 Hz의 표본 추출 비율(Sampling rate)로 100초 동안 3회 측정된 값을 평균

하여 거듭제곱 함수로 보간 하였다. 측정된 수두차를 유속으로 변환하기 위해 아래의 식(3)을 사용하였다.

$$Velocity (m/s) = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

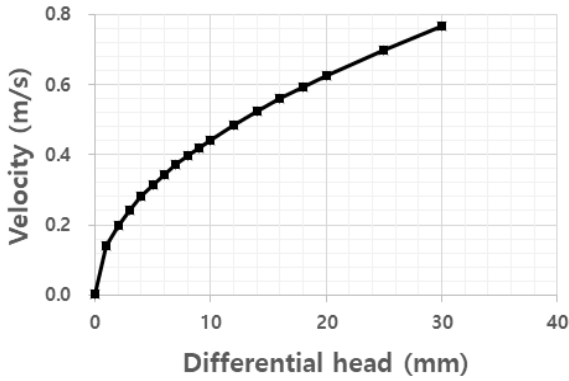


Fig. 4. Pitot-tube calibration curve.

유동이 벽면에 작용하는 마찰저항을 측정하기 위해 최대 용량은 $\pm 1N$ 이며 방수 처리가 되어 있는 동력계(Dynamometer)를 사용하였다. 반구 후방 후류영역에 길이 50mm, 폭 50mm 및 두께 10mm의 평판을 동력계와 연결하여 획득한 데이터는 증폭기를 통해 PC에 저장하였다. 동력계 캘리브레이션은 분동의 무게를 증가 및 감소시켜 총 3회를 반복하여 평균하였다.

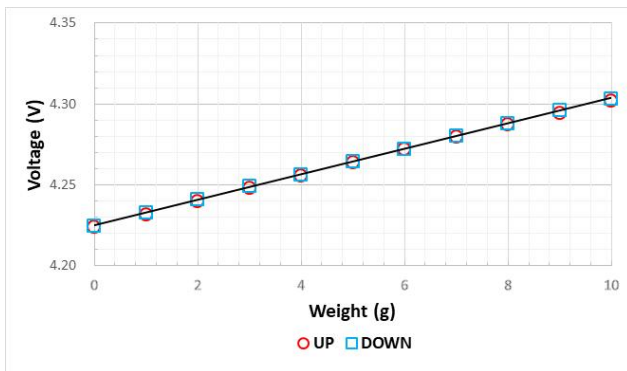
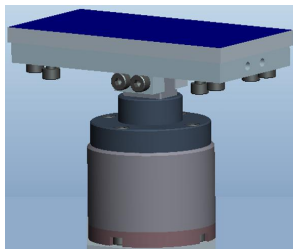


Fig. 5. Dynamometer and the calibration curve.

Fig. 5의 그래프에 보인 것과 같이 획득한 데이터로부터 계산된 재현오차는 0.008%, 비선형오차는 0.019% 및 이력오차는 0.089%이며 전체오차는 $\pm 0.09\%$ 로 계산되었다.

3. 결과 및 논의

3.1 유동 가시화

경계층 내 장애물에 접근하는 유체는 역압력구배에 의해 전방 표면으로부터 이탈하여 장애물 전방에 모이게 된다. 이때 결집된 유체는 장애물의 측면을 감싸며 유속방향 와류(정지 와류, 목걸이 와류 혹은 말굽 와류)로 변환된다(Gupta 1987; Hung et al., 1992; Zondag 1997). Fig. 6은 후류 영역으로부터 생성된 머리핀 와류가 말굽와류와 상호작용하는 과정을 0.5초 간격으로 가시화하여 보여준다. 반구 좌우측으로 박리된 유동이 후류영역에서 평판 표면을 따라 역류를 형성하여 반구 후방 표면을 타고 정점으로 향하고 전단흐름과 만나 머리핀 와류의 머리 부분이 생성된다. 또한 반구 전방에서는 말굽와류가 생성되어 반구 좌우측을 감싸며 후류영역과 상호작용하며 머리핀 와류 생성에 필요한 에너지를 지속적으로 공급한다(Toy and Savory, 1983; Visbal, 1991; Tufó et al., 1999).

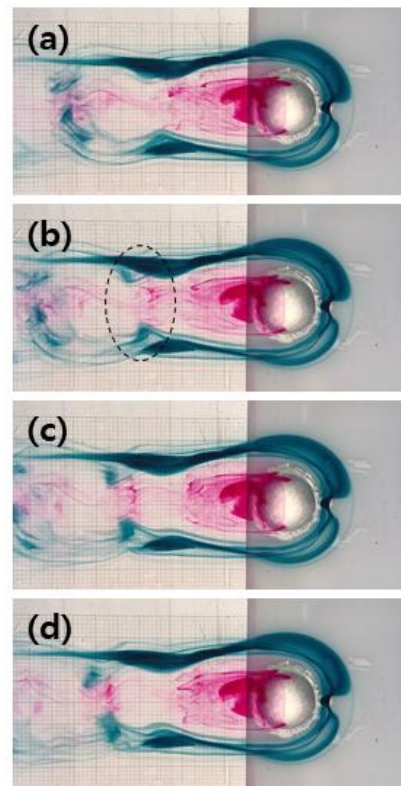


Fig. 6. One period of the hairpin vortex from the wake region. The time interval of the photos is 0.5 sec.

청색염료로 가시화된 말굽와류는 반구 주위를 감싸며 평판의 표면에 머무르고 하류방향으로 기다랗게 존재한다. 이때, 후류로부터 떨어져 나오는 머리핀 와류의 목 부분 와도에 의해 평판 표면의 청색염료는 머리핀 와류와 상호작용하며 경계층 외부영역으로 향하게 된다. Fig. 6(a)의 좌측 끝에는 두 와류가 서로 뒤엎겨 경계층으로 다가가는 현상을 나타내고, Fig. 6(b)의 점선은 청색염료가 머리핀 와류에 의해 표면으로부터 분리되는 현상을 나타내고 있다.

이 때 머리핀 및 말굽 와류 주위의 와도 방향에 의해 머리핀 와류 내부에는 외향 유동(Fig. 1의 청색 화살표)이 형성되어 분출(Ejection) 현상을 발생시키는 반면, 말굽와류는 후류영역 쪽으로 내향 유동이 유발되어 쓸림(Sweep) 현상으로 마찰저항을 증가시키는 역할을 하게 된다(Maxworthy, 1977; Pullin, 1979; James and Madnia, 1996; Glezer, 1998).

3.2 머리핀 와류 발생 빈도 및 마찰저항 측정

말굽와류를 가시화하기 위해 튜브로 청색염료를 흘려보내는 반구 전방의 구멍 직경은 10mm이고 흡입제어를 적용할 경우에는 튜브를 염료통에서 분리하여 회류수조 외부의 빈 통으로 유체를 흘려보냈다. 흡입속도를 변화시키기 위해 흡입 구멍을 막아 직경을 4mm로 감소시키고 그 변화를 확인하였다. 반구 상류쪽 가장자리로부터 흡입 구멍 중심까지의 거리는 5mm로 고정하기 위해 반구의 위치를 재조정하였다. 흡입 속도(V_{SUCK})는 식(4)로 계산되어 직경이 4mm일 경우는 0.15m/s이고, 직경이 10mm일 경우는 0.20m/s으로 계산된다. 그러므로 식(2)에 의해 흡입 구멍의 직경이 4mm와 10mm에 따라 자유유속(U_{∞})이 0.06m/s에서는 흡입비(SR)는 5.5 및 9.6으로 결정되고, 자유유속(U_{∞})이 0.08m/s에서는 흡입비(SR)는 3.8 및 6.6으로 결정된다.

$$Suction\ Velocity(V_{SUCK}) = \frac{Q_{SUCK}/t}{A} \quad (4)$$

여기서, Q_{SUCK} 은 흡입되어 비이커에 담긴 부피(140ml), t 는 140ml 비이커를 채우는데 걸리는 시간 및 A 는 흡입유량이 통과하는 단면적이다.

다양한 매개변수 조합(반구직경, 자유유속 및 흡입구멍 직경)에 의한 유동 가시화 결과를 분석하여 머리핀 와류 발생빈도를 Table 1에 정리하였다. 먼저, 반구 직경과 자유유속이 증가할수록 머리핀 발생빈도는 증가하는 결과를 보이는데 그 원인으로 말굽와류에 의해 후류영역으로 유입되는 에너지의 증가로 볼 수 있겠다. 또한 자유유속이 낮을수록 흡입제어에 의한 머리핀 와류 발생 주파수의 감소율은 증가하는데 흡입구멍이 4mm에서는 4배, 10mm에서는 3배 차이

를 나타낸다. 이는 말굽와류의 와도가 감소함으로써 후류영역으로 유입되는 고속의 유동이 감소됨을 나타낸다.

후류영역에 유입되는 에너지의 감소에 의해 변화되는 마찰저항을 측정하기 위해 반구의 직경은 50mm 및 자유유속(U_{∞})은 0.12m/s로 선정하였고, 동력계를 연결한 평판은 두께가 10mm이며 한 변의 길이가 50mm인 정사각형이다. 흡입제어를 실시함으로써 후류영역에서의 마찰저항은 0.521N에서 0.509N로 측정되어 2.3%가 저감되었다.

Table 1. The change of hairpin vortex frequency from the wake region without and with local wall suction

Dia. (mm)	U_{∞} (m/s)	Without Suction (Hz)	With Suction(Hz)		Frequency Reduction(%)	
			Hole Dia. 4mm	Hole Dia. 10mm	Hole Dia. 4mm	Hole Dia. 10mm
20	0.06	1.1	0.8	0.7	27.3	36.4
	0.08	1.6	1.5	1.4	6.3	12.5
30	0.06	1.2	0.9	0.8	25.0	33.3
	0.08	1.7	1.6	1.5	5.9	11.8
40	0.06	1.3	1.0	0.9	23.1	30.8
	0.08	1.8	1.7	1.6	5.6	11.1
50	0.06	1.4	1.1	1.0	21.4	28.6
	0.08	1.9	1.8	1.7	5.3	10.5

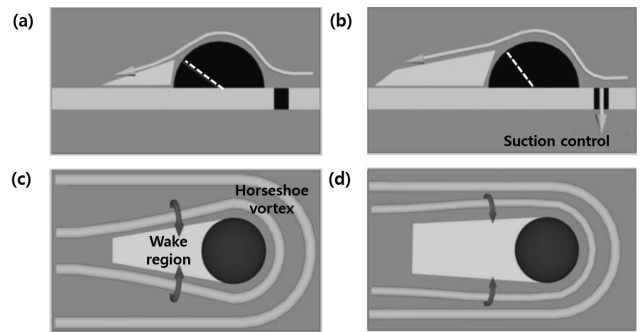


Fig. 7. The mechanism of the skin-friction reduction by the local wall suction. (a) Side view without the control (b) Side view with the control (c) Plan view without the control (d) Plan view with the control. The dotted line is the separation point.

흡입제어를 하지 않은 Fig. 7(a)와 흡입제어를 실시한 Fig. 7(b)에서 화살표로 표시된 유동은 말굽와류가 생성되는 반구 전방의 구멍으로 흡입제어를 실시함으로써 반구 표면을 따

르는 유동의 박리점(흰색 점선)은 상류쪽으로 이동한다. 이는 후류영역의 크기를 증가시켜 역류가 박리점까지 도달하는 시간이 증가되어 머리핀 와류 발생 주파수를 감소시킨다. 또한 흡입제어를 하지 않은 Fig. 7(c)와 흡입제어를 실시한 Fig. 7(d)에서 반구 측면을 에워싸는 두 개 중 내부에 위치한 말굽와류는 흡입제어를 실시함으로써 후류영역과 간격이 증가하고 약해진 와도로 인해 높은 운동량의 유동 유입도 감소되어 벽면 마찰저항이 감소하게 된다.

4. 결론

화석연료를 사용하는 수송 산업계에서는 새로워진 환경규제를 충족시키기 위해 마찰저항 저감장치 개발에 적극적이다. 효율적인 설계를 위해 난류 구조물 상호간 에너지 전달 메커니즘을 상세하게 파악할 필요가 있다. 본 연구는 난류 경계층을 유지하기 위해 다양한 형태의 와류가 생성 및 소멸되는 과정에서 발생하는 상호작용을 규명하기 위한 초기 연구로 수행되었다. 층류 경계층 내 반구 전방 및 측방에서 말굽와류가 생성되고, 후류영역 내에서는 역류가 전단흐름을 만나 머리핀 와류로 변환되는 과정을 염료로 유동 가시화하였다. 또한, 반구 전방에 뚫은 구멍을 통해 흡입제어를 적용함으로써 말굽와류의 와도를 감소시켜 빠른 유속의 유동이 후류영역으로 유입되는 것을 방해하였다. 이러한 과정에서 마찰저항 변화량은 후류영역에 설치한 평판을 동력계에 연결하여 측정하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 머리핀 와류의 생성은 Fig. 1에서 보여주듯이 유동 내 장애물 등에 의한 역압력구배로 벽면에서 유동방향의 수직으로 횡방향 와류가 생성된다. 그리고, 그 주위에 생성되는 와도 방향으로 쓸림(Sweep) 및 분출(Ejection) 현상이 발생하여 경계층 내부와 외부 영역 간 난류 에너지 교환이 이루어진다. 특히, 머리핀 와류가 경계층까지 성장하는 동안 그 구조물은 유동방향으로 스트레칭 과정이 지속되어 벽면에 위치한 다리부분의 직경은 줄어들지만 와도는 증가하게 된다. 즉, 증가된 와도가 높은 운동량을 벽면으로 향하게 하여 마찰저항을 증가시킨다.

2) 실험에서 사용된 반구직경은 20mm, 30mm, 40mm 및 50mm이며 자유유속은 0.06m/s와 0.08m/s이고 흡입구멍의 크기는 4mm와 10mm이다. 자유유속이 낮고 반구 크기가 작을수록 유동 가시화 분석에 용이하였으며, 후류영역으로부터 발생하는 머리핀 와류 주파수의 감소율은 증가되었다. 즉, 반구 전방 구멍 직경은 10mm이고 자유유속은 0.06m/s 및 반구 직경은 20mm로 측정된 머리핀 와류 주

파수 감소율은 36.4%였다. 흡입제어에 의해 반구 표면을 따라 흐르는 유동은 역압력구배를 극복하지 못하고 비제어의 박리점보다 상류쪽에서 발생하게 된다. 이로 인해 반구 후류 영역은 하류방향으로 증가하여 머리핀 와류 발생 주기가 증가되었다.

3) 유동 가시화에 최적화된 느린 자유유속과 작은 반구 직경은 마찰저항 측정하기에는 그 변화량이 미비하여 자유유속(U_{∞})을 0.12m/s로 증가시키고 반구 직경은 50mm 및 흡입구멍 직경은 10mm에서 마찰저항 변화량을 측정하였다. 동력계를 연결한 평판은 두께가 10mm이며 한 변의 길이는 반구 직경인 50mm의 정사각형으로 후류영역 위치에 설치하였다. 후류영역 측면에 위치한 말굽와류에 의해 유입되는 유동은 상대적으로 높은 운동량을 갖는데 흡입제어에 의해 그 양이 줄어들어 마찰저항은 2.3%가 저감되었다.

본 연구는 경계층 내 반구 후류영역으로 지속적인 에너지를 공급하는 말굽 와류를 흡입 제어함으로써 마찰저항에 어떻게 관여하는지를 규명하였다. 이를 바탕으로 향후 연구과제로는 경계층 외부영역으로 성장해 나가는 머리핀 와류의 머리 부분을 제어함으로써 표면에 머무르는 다리부분의 와류가 마찰저항에 관여하는 메커니즘을 규명하는 것이다.

References

- [1] Abe, H., H. Kawamura, and Y. Matsuo(2001), Direct Numerical Simulation of a Fully Developed Turbulent Channel Flow with Respect to the Reynolds Number Dependence, Transactions of the ASME, 123, pp. 382-393.
- [2] Balakumar, P. and E. Widnall(1986), Application of Unsteady Aerodynamics to Large-Eddy Breakup Devices in a Turbulent Flow, Phys. Fluids, 29, No. 6, pp. 1779-1787.
- [3] Doligalski, T. L., C. R. Smith, and J. D. A. Walker(1994), Vortex Interactions with Walls, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 26, pp. 573-616.
- [4] Glezer, A.(1998), The Formation of Vortex Rings, Phys. Fluids, 31, No. 12, pp. 3532-3542.
- [5] Guezennec, Y. G. and H. M. Nagib(1990), Drag Reduction in Turbulent Boundary Layers, AIAA J., 28, p. 245.
- [6] Gupta, A. K.(1987), Hydrodynamic Modification of the Horseshoe Vortex at a Vertical Pier Junction with Ground, Phys. Fluids, 30, No. 4, pp. 1213-1215.
- [7] Hung, C. M., C. H. Sung, and C. L. Chen(1992), Computation of Saddle Point of Attachment, AIAA J., 30,

No. 6, pp. 1561-1569.

- [8] Hutchins, N. and K. S. Choi(2002), Towards a Greater Understanding of Turbulent Skin-Friction Reduction, Proceedings of the ASME FEDSM, Paper No. 2002-31060.
- [9] Iwamoto, K., Y. Suzuki, and N. Kasagi(2002), Reynolds Number Effect on Wall Turbulence: Toward Effective Feedback Control, Int. J. Heat and Fluid Flow, 23, pp. 678-689.
- [10] James, S. and C. K. Madnia(1996), Direct Numerical Simulation of a Laminar Vortex Ring, Phys. Fluids, 8, No. 9, pp. 2400-2414.
- [11] Kang, Y. D., K. S. Choi, and H. H. Chun(2008), Direct Intervention of Hairpin Structures for Turbulent Boundary-Layer Control, Phys. Fluids, 20, pp. 101517-1-101517-13.
- [12] Kline, S. J., W. C. Reynolds, F. A. Schraub, and P. W. Runstadler(1967), The Structure of Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech., 30, pp. 741-773.
- [13] Maxworthy, T.(1977), Some Experimental Studies of Vortex Rings, J. Fluid Mech., 81, pp. 465-495.
- [14] Pullin, D. I.(1979), Vortex Ring Formation at Tube and Orifice Openings, Phys. Fluids, 22, No. 3, pp. 401-403.
- [15] Robinson, S. K.(1990), A Perspective on Coherent Structures and Conceptual Models for Turbulent Boundary Layer Physics, AIAA Paper No. 90-1638, pp. 1-16.
- [16] Schlichting, H.(1968), Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill
- [17] Sahlin, A., A. V. Johansson, and P. H. Alfredsson(1988), The Possibility of Drag Reduction by Outer Layer Manipulators in Turbulent Boundary Layers, Phys. Fluids, 31, No. 10, pp. 2814-2820.
- [18] Toy, N. and E. Savory(1983), Turbulent Shear Flow in the Near Wake of a Hemisphere, Proceedings of the 8th Symposium on Turbulence, pp. 145-156.
- [19] Tufo, H. M., P. F. Fischer, M. E. Papka, and M. Szymanski(1999), Hairpin Vortex Formation, a Case Study for Unsteady Visualisation, 41st CUG Conference.
- [20] Visbal, M. R.(1991), Structure of Laminar Juncture Flows, AIAA J., 29, No.8, pp. 1273-1282.
- [21] Zondag, H. A.(1997), The Dynamics of Hairpin Vortices in a Laminar Boundary Layer, PhD Thesis, University of Eindhoven.

Received : 2019. 09. 27.

Revised : 2019. 10. 17.

Accepted : 2019. 10. 28.