

패러글라이딩 헬멧의 항력 감소에 관한 실험적 연구

황종빈* · 박정목** · 송진석** · 김주하[†]

Experimental study on the drag reduction of a helmet for paragliding

Jongbin Hwang^{*}, Jungmok Park^{**}, Jinseok Song^{**} and Jooha Kim[†]

Abstract In the present study, wind tunnel experiments were performed to reduce the drag of a paragliding helmet in the range of Reynolds numbers from 46,000 to 155,000. The drag force of the helmet model with dimples and deflectors installed was measured by varying the dimple depth and the slant angle of the deflector. The dimples were effective in reducing the drag at low Reynolds numbers, but no significant drag reduction was found in the Reynolds number range in which an actual paraglider flight takes place. On the other hand, the deflector installed tangentially to the side outline of the helmet showed an average drag reduction of 7% in the flight Reynolds number range of real paragliding. This was because the deflector shrunk the size of the wake region and moved the wake region downstream of the deflector.

Key Words : Paragliding helmet(패러글라이딩 헬멧), Dimple(딤플), Deflector(디플렉터), Drag(항력), Flow separation(유동박리), Wake(후류)

1. 서론

패러글라이딩은 낙하산 활강과 행글라이딩의 원리를 병합한 항공 스포츠로 수 시간 동안 수백 킬로미터를 비행하는 특징을 갖는다. 패러글라이딩에서 높은 성적을 내려면 긴 시간 동안 먼 거리를 빠른 속도로 비행해야 하기 때문에 패러글라이더의 공기역학적 성능을 개선하는 것은 경기력 향

상을 위해 매우 중요하다. 패러글라이더는 크게 날개에 해당하는 캐노피(canopy), 패러글라이더를 조종하는 파일럿 및 파일럿이 탑승하는 하네스(harness), 캐노피와 하네스를 연결하는 산줄(lines)로 구성된다(Fig. 1). Fig. 2는 비행 속도에 따른 패러글라이더의 구성요소 별 공기저항을 나타낸 것이다. 비행 속도 전 구간에서 캐노피의 형상 항력(profile drag)과 유도 항력(induced drag)의 합이 패러글라이더에 작용하는 공기저항 중 가장 큰 비중을 차지하며, 파일럿과 산줄에 작용하는 공기저항은 비슷한 것을 볼 수 있다. 따라서 지금까지 패러글라이더의 공력 성능 향상은 캐노피를 중심으로 이루어지고 있다. 예를 들어 경기용 패러글라이더 캐노피 표면은 가능한 매끈하게 디자인하는데⁽²⁾, 이는 램 에어(ram air)로 인해 캐노피의 표면이 부풀어올라 울퉁불퉁 해짐에 따라 양력이 감소하는

[†] Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Associate Professor
E-mail: kimjooa@unist.ac.kr

^{*} Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Graduate student, combined MS-Ph.D

^{**} Gin Gliders Inc.



Fig. 1. Components of a paraglider.

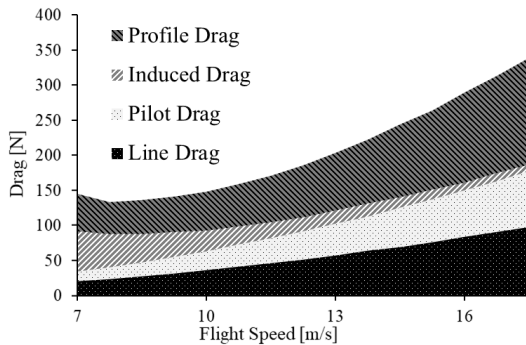


Fig. 2. Drag of each component of a paraglider (redrawn from Babinsky⁽¹⁾).

것을 막기 위한 것이다. 한편, 비행속도가 증가할수록 패러글라이더의 구성요소 별 공기저항 중 파일릿과 산줄이 차지하는 비중이 커지기 때문에 (Fig. 2) 산줄과 하네스에 작용하는 저항을 줄이기 위한 시도도 이어지고 있다. 예를 들어, 산줄에 작용하는 공기저항을 줄이기 위해 더 얇으면서도 적은 개수의 산줄로 캐노피와 하네스를 연결하고 있으며⁽³⁾, 파일릿에 작용하는 공기저항을 줄이기 위해 비행 시 필요한 각종 계기들과 파일릿의 하체를 감싸는 하네스의 형상을 매끈하고 슬림하게 디자인(Fig. 1 참고)하고 있다⁽⁴⁾.

상술한 바와 같이 캐노피, 산줄, 하네스의 공력 성능 향상을 위한 연구는 활발하게 이루어지고 있으나, 상대적으로 파일릿이 착용하는 헬멧의 항력

저감을 위한 시도는 많지 않다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 시야 확보와 캐노피 조종을 위해 파일릿의 머리와 팔은 하네스 외부에 항상 노출되어 있으며, 특히 머리는 팔에 비해 더 큰 특성 길이를 갖는 뭉툭한 형상이기 때문에 이곳에서 발생하는 저항이 파일릿에 작용하는 저항 중 큰 비중을 차지할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 다양한 유동 제어 장치를 패러글라이딩 헬멧에 적용하고 각 장치가 항력을 줄이는 정도를 비교하고자 한다. 또한 항력 감소 장치가 설치되지 않은 기본 헬멧과 공기 저항 감소 효과가 가장 뛰어난 장치가 설치된 헬멧에 대해 유동 가시화를 실시하여 항력이 저감 되는 원인을 파악하고자 한다.

2. 실험 모델 및 방법

2.1 패러글라이딩 헬멧 모델

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 패러글라이딩 헬멧 모델의 평면도와 측면도이다. 본 모델은 Icaro2000에서 생산되는 실제 패러글라이딩 헬멧(모델명: 4flight cut)과 기하학적 상사를 만족하도록 3D 스캐닝과 3D 프린팅을 거쳐 ABS 재질로 제작하였다. 헬멧 모델의 길이(L), 너비(W) 및 높이(H)는 각각 300 mm, 230 mm, 300 mm로 실제 헬멧과 크기가 동일하다. 비행시 파일릿의 얼굴을 보호하는 바이저는 닫힌 상태로 유지되기 때문에 본 헬멧 모델도 바이저가 닫힌 형태로 제작되었다.

위에서 바라본 헬멧 모델은 약간 납작한 타원 형태이며 뾰족한 모서리가 없기 때문에(Fig. 3(a)) 유동 박리점은 특정 위치에 고정되지 않을 것으로

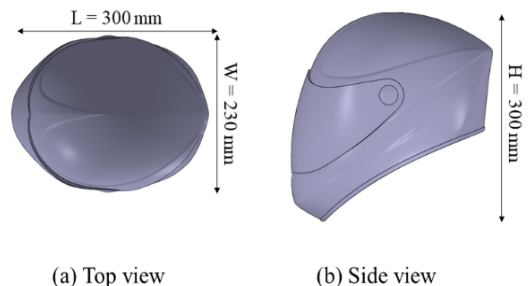


Fig. 3. (a) Top and (b) side views of a paragliding helmet model.

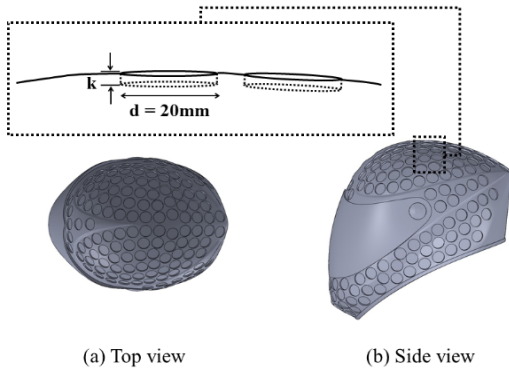


Fig. 4. (a) Top and (b) side views of the helmet model with dimples.

예상된다. 따라서 본 연구에서는 고정되지 않은 유동 박리점을 지연시킬 수 있다고 알려진 딤플을 헬멧 표면에 설치하여 항력을 줄일 수 있는지 알아보았다. Fig. 4는 딤플이 설치된 헬멧 모델의 평면도와 측면도이다. Fig. 4(b)의 삽입 그림에 나타난 바와 같이 딤플은 헬멧 표면에 작은 실린더 형태의 홈을 파내어 설치하였으며, 딤플의 직경($d=20\text{ mm}$)과 깊이(k)는 선행 논문^(5,6)에서 구에 설치되었을 때 항력 감소율이 가장 높은 것으로 보고되었던 딤플의 형상을 참고하여 설정하였다. 특히 딤플이 항력을 감소시킬 때 딤플의 깊이가 가장 지배적인 영향을 가진다고 알려져 있기 때문에⁽⁶⁾, 본 연구에서는 헬멧의 너비로 무차원화된 딤플의 깊이(k/W)를 4.3×10^{-3} 과 8.7×10^{-3} 의 두 가지로 바꾸어가며 실험을 진행하였다. 또한 표면에 딤플이 많을수록 항력 저감 효과가 크기 때문에 본 연구에서는 딤플 사이의 간격이 거의 일정하게 유지되면서 가능한 많은 수의 딤플이 배치될 수 있도록 하였다. 헬멧 표면에 설치된 딤플은 214개이며 딤플이 차지하는 면적은 헬멧 전체 표면적의 70% 이상이다.

또한 본 연구에서는 주 유동 박리점을 헬멧의 뒷전(trailing edge)보다 더 하류 방향으로 이동시키는 것이 가능한지 알아보기 위해 패러글라이딩 헬멧에 디플렉터를 적용해 보았다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 디플렉터는 기본 헬멧의 뒷전에 위치한 왼쪽과 오른쪽 모서리에 설치되었으며, 주 유동방향과 디플렉터가 이루는 각(q)은 두 가지(0° 와 28°)로 하였다. 이 때 $q = 0^\circ$ 는 디플렉터가 자유 유

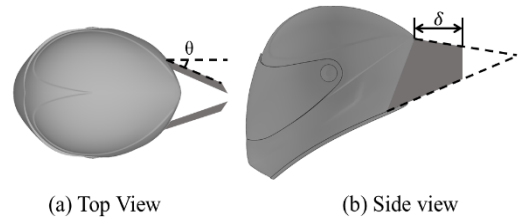


Fig. 5. (a) Top and (b) side views of the helmet model with deflectors.

동과 나란한 경우, $q = 28^\circ$ 는 디플렉터가 헬멧의 평면 윤곽선과 접하면서 후류 방향으로 연장되는 경우를 의미한다. 디플렉터의 구체적인 형상은 Fig. 5(b)에 도시한 바와 같으며, 디플렉터의 윗 모서리와 아랫 모서리(Fig. 5(b)의 점선)는 헬멧의 윗 윤곽선과 아랫 윤곽선에 가능한 부드럽게 이어지도록 설계하였다. 본 연구에서는 헬멧 뒷전부터 디플렉터 뒷전까지의 길이(δ)를 바꾸어가며 사전 실험을 진행했으며, $\delta \geq 55\text{ mm}$ 일 때 디플렉터의 길이에 따른 헬멧의 항력계수 변화는 거의 없는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 동일한 효과를 가지면서도 최소한의 크기를 갖는 디플렉터 형상($\delta = 55\text{ mm}$)을 대상으로 논의를 진행하고자 하며, $\delta = 55\text{ mm}$ 일 때 디플렉터 뒷전의 높이는 46 mm 이다.

2.2 실험 방법

Fig. 6은 본 연구에서 진행된 헬멧 항력 측정 실험의 개략도이다. 항력 측정 실험은 폭 1 m , 높이 1 m , 길이 5 m 의 시험부를 갖는 NPL 타입 개방형 풍동에서 진행되었다. 주 유동의 난류 강도는 20 m/s 의 자유 유동 속도에서 0.4% 미만이었다. 헬멧 모델은 시험부의 중앙에 위치하도록 타원 형상의 단면을 갖는 지지대를 이용하여 고정되었으며, 실제 비행시 파일럿이 취하는 자세를 반영할 수 있도록 헬멧의 피치 각을 설정하였다. 시험부에 설치된 헬멧 모델의 유동방향에 수직한 투영 단면적은 시험부 단면적의 약 5%이다. 지지대의 아랫쪽 끝에는 로드셀(AB120)을 설치하여 헬멧과 지지대에 작용하는 항력을 측정하였으며, 항력에 비례하는 로드셀 신호는 증폭기와 아날로그/디지털 컨버터

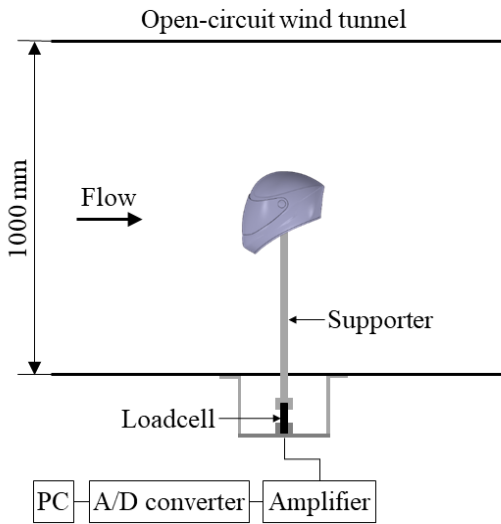


Fig. 6. Schematic diagram (side view) of the experimental setup for drag measurement.

를 거쳐 실험용 PC로 전송하였다. 헬멧 외부에 노출된 지지대에 작용하는 항력은 별도로 측정한 후 이를 헬멧과 지지대에 작용하는 항력에서 빼어 헬멧의 항력계수를 보정하였다. 항력 측정 실험이 수행된 레이놀즈 수(자유 유동 속도와 헬멧의 너비 기준) 범위는 $0.46 \times 10^5 - 1.55 \times 10^5$ 이며 이는 레저용 및 경기용 패러글라이딩의 비행 속도를 기준으로 한 레이놀즈 수 범위($0.86 \times 10^5 - 1.3 \times 10^5$)를 포함한다.

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 기본 헬멧 모델(Fig. 3)과 항력 저감 효과가 뛰어난 장치가 설치된 헬멧에 대해 연선(smoke wire) 가시화 실험을 수행하였으며, 이 실험의 개략도를 Fig. 7에 도시하였다. 연선 가시화는 항력 측정 실험과 동일한 방법으로 풍동 시험부에 헬멧 모델을 설치하고 수행하였다. 연선에 의한 유동 교란을 최소화하기 위해 두께 0.1 mm 이하의 니크롬선을 유동 방향과 수직하게 설치하였으며, 유동 박리의 변화를 가장 뚜렷하게 관찰하기 위해 니크롬선의 수직 방향 위치는 헬멧의 폭이 최대가 되는 위치와 일치하게 하였다. 헬멧 모델을 지나는 유동의 유선 또는 후류를 관찰하기 위해 니크롬선은 헬멧 모델보다 상류 또는 하류에 설치하였으며, 논문의 간결성을 위해 Fig. 7에는 모델의 상류에 설치한 경우

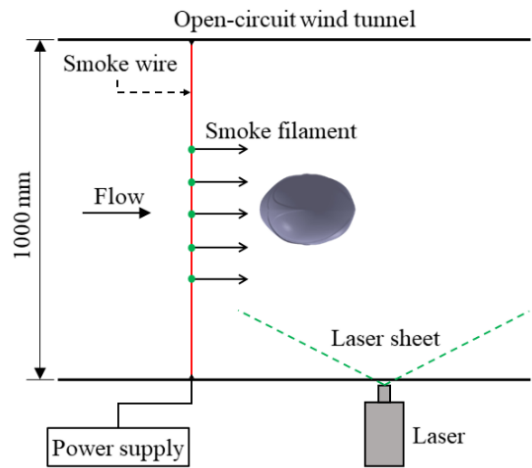


Fig. 7. Schematic diagram (top view) of the experimental setup for smoke wire visualization.

만 도시하였다. 글리세롤과 프로필렌 글리콜이 혼합된 용액을 니크롬선에 바른 후 전원 공급장치를 이용해 니크롬선의 양 끝에 28 V의 전압을 인가하여 연기 필라멘트를 발생시켰으며, 헬멧 모델을 지나는 연기 필라멘트는 DSLR 카메라(Nikon D3500)로 촬영하였다. 이 때 연기 필라멘트가 생성되는 평면에 레이저(DPSS laser) 평면광을 조사하여 필라멘트의 거동이 더 선명하게 보이도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 항력 측정 결과

Fig. 8은 항력 저감 장치가 설치되지 않은 기본 모델(base model)과 덤플 및 디플렉터가 설치된 헬멧 모델의 레이놀즈 수(Re)에 따른 항력 계수(C_D)의 변화를 나타낸 것이다. 기본 모델의 항력 계수(Fig. 8의 동그라미 표시)는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 급격히 감소하다가 0.9×10^5 이상의 레이놀즈 수에서 0.50 보다 약간 작은 값을 가지며 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 따라서 헬멧을 지나는 유동은 항력 계수 변화를 기반으로 임계 레이놀즈 수 영역($0.46 \times 10^5 < Re < 0.9 \times 10^5$)과 초임계 레이놀즈 수 영역($0.9 \times 10^5 < Re < 1.55 \times 10^5$)으로 나눌 수 있으며, 이러한 특성은 구를 지나는 유동 특성과 비슷하다⁷⁾. 이는 2.1에서 서술

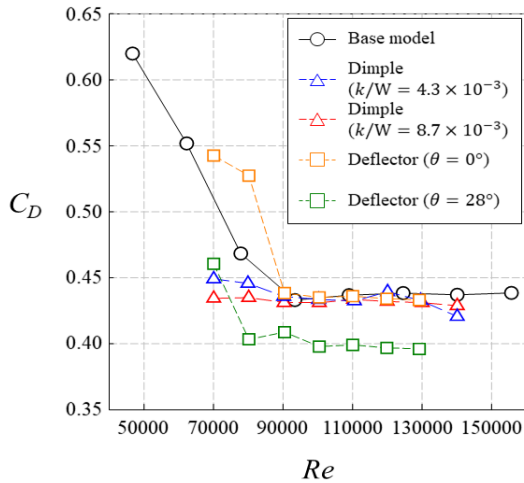


Fig. 8. Variations in the drag coefficient with the Reynolds number.

한 바와 같이 패러글라이딩 헬멧이 약간 납작한 타원 형태를 갖기 때문이다. 임계 레이놀즈 수 영역과 초임계 레이놀즈 수 영역의 상세한 유동 특성 차이는 3.2에서 논의할 것이다. 2.2에 제시한 레이저용 및 경기용 패러글라이딩 헬멧의 레이놀즈 수 범위는 대부분 초임계 레이놀즈 수에 해당하며, 따라서 실제 비행 조건에서 헬멧에 작용하는 공기 저항을 효과적으로 줄이기 위해서는 초임계 레이놀즈 수 범위에 대한 유동 제어가 필요함을 알 수 있다.

딴플이 설치된 헬멧 모델의 항력 계수(Fig. 8의 세모 표시)는 기본 모델의 임계 레이놀즈 수 영역에서 이미 0.50 근처로 감소된 것을 볼 수 있으며, 이는 딴플 모델의 임계 레이놀즈 수 범위가 기본 모델에 비해 더 낮은 레이놀즈 수에 위치함을 의미한다. 즉 헬멧 표면에 설치된 딴플은 항력 계수가 급격히 감소하기 시작하는 임계 레이놀즈 수를 낮추는 역할을 하며, 이러한 역할은 구에 설치된 딴플에 대한 선행 연구^(5,8,9)에서도 보고된 바 있다. $Re < 0.9 \times 10^5$ 에서 무차원화된 딴플의 깊이가 클수록 항력 계수가 더 낮은 것은 딴플이 깊을수록 임계 레이놀즈 수가 더 작아져서 항력 계수의 급격한 감소가 더 빨리 발생하기 때문이다. 상술한 바와 같이 딴플은 항력 계수가 더 빨리(즉, 더 낮은 레이놀즈 수에서) 감소하도록 유도하는 데는 효과적이지만 더 많이(즉, 더 낮은 항력 계수까지) 감소

하도록 유도하는 데는 한계가 있다. 기본 모델의 초임계 레이놀즈 수 영역에서 딴플이 적용된 헬멧의 항력 계수는 기본 모델과 비슷하거나 약간(최대 3%) 작은 수준이며, 실제 비행 조건에서 패러글라이딩 헬멧의 레이놀즈 수 범위가 대부분 초임계 레이놀즈 수 영역에 속하는 것을 고려할 때, 딴플은 효과적인 항력 저감 장치로 기능하기 어렵다고 결론지을 수 있다.

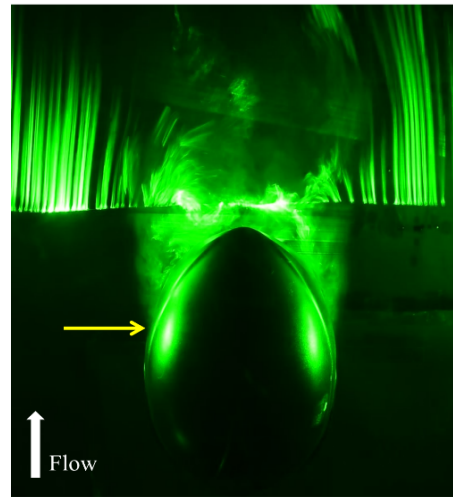
디플렉터가 설치된 헬멧의 항력 계수(Fig. 8의 네모 표시)는 유동 방향에 대해 디플렉터가 기울어진 각도(Fig. 5의 q)에 따라 그 크기가 매우 다르다. 디플렉터가 유동 방향과 나란할 때($q = 0^\circ$) 디플렉터 모델의 항력 계수는 $Re < 0.9 \times 10^5$ 에서 기본 모델보다 더 크지만 $Re > 0.9 \times 10^5$ 에서는 기본 모델과 비슷하거나 약간(최대 3%) 작은 것을 볼 수 있다. $Re < 0.9 \times 10^5$ 에서 디플렉터 모델이 기본 모델보다 더 큰 항력계수를 갖는 것은 디플렉터의 설치로 인한 국소적인 재순환영역의 형성과 관계가 있는 것으로 보인다. Fig. 5(a)에 도시한 바와 같이 $q = 0^\circ$ 일 때 헬멧과 디플렉터의 접합부에서 표면 곡률이 급격하게 변하게 된다. 3.2에서 살펴보겠지만, $Re < 0.9 \times 10^5$ 에서 헬멧과 디플렉터의 접합부는 유동 박리점보다 후류에 위치하기 때문에 접합부 표면 근처에서 역류가 형성될 것으로 예상된다. 이 때 접합부는 표면 곡률의 급격한 변화로 인해 오목한 형태를 갖기 때문에 이 곳에 국소적인 재순환영역이 형성될 것이며, 따라서 낮은 압력이 헬멧 후방에 위치하여 디플렉터 모델의 항력이 상대적으로 높아질 것으로 추측된다. 실제 비행 조건을 포함하는 초임계 레이놀즈 수 영역에서 $q = 0^\circ$ 인 디플렉터의 항력 저감 효과는 딴플과 비슷하며, 따라서 항력 저감 장치로서의 실효성은 크지 않음을 알 수 있다. 한편 $q = 28^\circ$ 인 디플렉터 모델의 항력 계수는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 급격히 감소한 후 거의 일정하게 유지된다는 점에서 기본 모델의 항력 계수와 비슷하지만 실험이 진행된 모든 레이놀즈 수 범위에서 기본 모델의 항력 계수보다 작은 값을 갖는다. 실전 비행 레이놀즈 수 영역에서 해당 디플렉터 모델의 평균 항력 계수는 0.45이며 이는 동일한 레이놀즈 수 영역에서 기본 모델의 평균 항력 계수(0.48)보다 약 7% 작은

값이다. 따라서 헬멧의 평면 윤곽선과 접하면서 후류 방향으로 연장되는 형태($q = 28^\circ$)의 디플렉터는 실제 패러글라이더가 비행하는 초임계 레이놀즈 수 영역에서 다른 장치에 비해 효과적으로 항력을 줄이는 것을 알 수 있으며, 추후 최적화를 통해 실제 패러글라이딩 헬멧에 적용하면 패러글라이더의 공력 성능을 높이는데 유의미하게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 해당 디플렉터가 어떻게 유동을 제어하여 헬멧 모델의 항력 계수를 감소시키는지에 대해서는 3.2에서 유동 가시화 결과를 토대로 논의할 것이다. 디플렉터의 기울어진 각도에 따라 항력 계수의 크기는 다르지만, 항력 계수의 변화 양상은 q 에 관계 없이 비슷하다는 점은 흥미롭다. 즉, 서로 다른 $q(= 0^\circ, 28^\circ)$ 만큼 기울어진 두 디플렉터 모델의 항력 계수는 기본 모델과 비슷한 레이놀즈 수 영역에서 급격히 감소한 후 거의 일정하게 유지된다는 공통점을 갖는다. 이로부터 본 연구에서 다른 디플렉터는 임계 레이놀즈 수를 낮추는 역할을 하지 않는다는 것을 알 수 있으며, 이는 패러글라이딩 헬멧의 유동 제어 측면에서 디플렉터와 딥플의 가장 두드러진 차이이다.

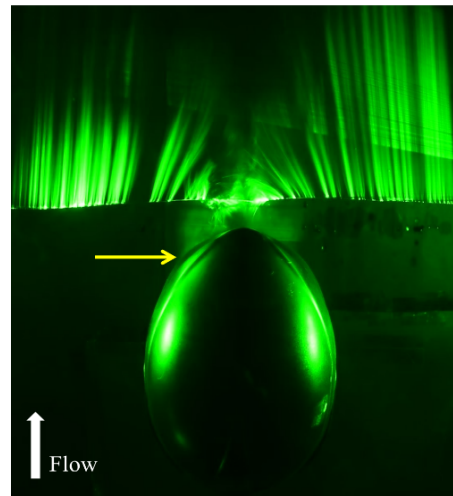
3.2 유동 가시화 결과

본 연구에서는 기본 헬멧 모델 주위 유동이 임계 레이놀즈 수 영역과 초임계 레이놀즈 수 영역에서 어떻게 다른지 살펴보고, 실제 비행 조건에서 디플렉터($q = 28^\circ$) 모델이 기본 모델보다 낮은 항력 계수를 갖는 이유를 알아보기 위해 연선 가시화를 수행하였다.

Fig. 9는 임계 레이놀즈 수 영역($Re = 0.5 \times 10^5$)과 초임계 레이놀즈 수 영역($Re = 1.1 \times 10^5$)에서 기본 헬멧 모델의 연선 가시화 결과를 비교한 것이다. 비교적 높은 항력 계수를 갖는 임계 레이놀즈 수 영역(Fig. 8 참고)에서는 헬멧 모델의 좌우 끝 근처(Fig. 9(a)의 노란 화살표)에서 유동 박리가 발생하는 반면 낮은 항력 계수를 갖는 초임계 레이놀즈 수 영역에서는 헬멧 모델의 뒷면 근처(Fig. 9(b)의 노란 화살표)에서 유동 박리가 발생하는 것을 볼 수 있다. 후류 영역의 폭은 임계 레이놀즈 수 영역에서는 헬멧 모델의 너비와 비슷하거나 약간



(a) $Re = 0.5 \times 10^5$

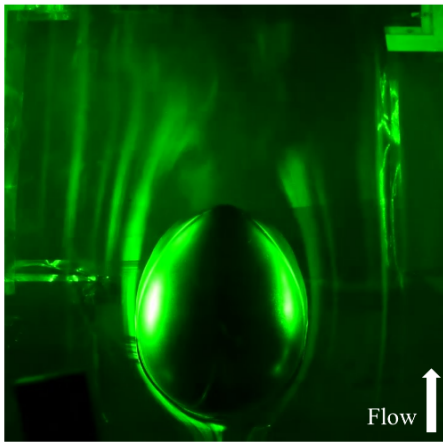


(b) $Re = 1.1 \times 10^5$

Fig. 9. Smoke-wire visualizations of the base model at (a) $Re = 0.5 \times 10^5$ and (b) $Re = 1.1 \times 10^5$.

더 크지만 초임계 레이놀즈 수 영역에서는 헬멧 모델 너비의 반 정도로 줄어든다. 레이놀즈 수의 증가에 따라 후류 영역이 축소되는 것은 상술한 바와 같이 유동 박리점이 임계 레이놀즈 수 영역보다 초임계 레이놀즈 수 영역에서 더 하류로 이동하기 때문이다. 따라서 유동 박리의 지연에 따른 후류 영역의 축소가 헬멧 모델의 항력 계수가 임계 레이놀즈 수 영역을 거치면서 급격히 감소하는 원인임을 알 수 있다.

Fig. 10은 실제 비행 조건($Re = 1.3 \times 10^5$)에서



(a) Base model

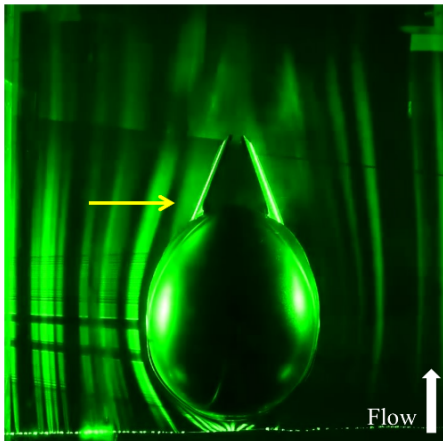
(b) Deflector ($\theta = 28^\circ$)

Fig. 10. Smoke-wire visualizations of the (a) base model and (b) deflector model ($q = 28^\circ$) at $Re = 1.3 \times 10^5$.

기본 헬멧 모델과 $q = 28^\circ$ 인 디플렉터가 설치된 모델의 연선 가시화 결과이다. 기본 모델(Fig. 10(a))과 디플렉터 모델(Fig. 10(b))을 지나는 유동은 모두 헬멧의 뒷전 근처에서 헬멧 표면으로부터 떨어져 나가는 것을 볼 수 있다. 그러나 디플렉터 모델의 연선 가시화 이미지에서는 디플렉터 표면을 따르는 유동(Fig. 10(b)의 노란 화살표)이 추가로 관찰되며, 이는 기본 모델의 가시화 이미지에서는 관찰되지 않는 중요한 특징이다. 디플렉터 표면을 따르는 유동은 다음과 같이 코안다 효과⁽¹⁰⁾에 의해 유도되는 것으로 보인다. 코안다 효과는 유동이 인접한 물체의 표면을 따라 휘어지는 현상을 말한다.

이 때, 유동이 휘어지는 것은 물체의 존재로 인해 유체에 작용하는 압력의 균형이 깨지고 물체의 표면을 향해 알짜힘이 작용하기 때문인 것으로 알려져 있다. Fig. 10(b)에 보이는 것처럼 헬멧 모델을 지나는 유선은 휘어져 있으며, 오일러 공식에 따르면 휘어진 유선의 오목한 쪽은 볼록한 쪽 보다 압력이 낮다. 유동은 헬멧 모델 뒷전 근처에서 박리된 이후 바로 뒷전 모서리에 설치된 디플렉터 주위를 지나게 되며, 디플렉터는 헬멧의 뒷전 하류에 형성된 유선의 오목한 쪽에 위치하기 때문에 상대적으로 낮은 압력을 갖는다. 따라서 디플렉터 주위를 지나는 유동은 상술한 압력 차이로 인해 주변의 공기를 동반하여 디플렉터 표면을 따르는 공기의 흐름을 형성할 것이다. 이와 같이 형성된 유동은 디플렉터 뒷전에서 박리되는데, 자유 유동에 대해 28° 만큼 기울어진 디플렉터의 좌우 뒷전은 서로 매우 가깝게 위치하므로 결과적으로 매우 좁은 후류 영역이 디플렉터 하류에 형성될 것으로 예상된다. 그러므로 $q = 28^\circ$ 인 디플렉터는 낮은 압력을 갖는 후류 영역을 헬멧 모델의 하류로 이동시키고 동시에 그 크기를 수축시키는 효과를 가지며 이에 따라 3.1에서 설명한 바와 같이 항력 계수를 줄이게 된다. 반면 $q = 0^\circ$ 인 디플렉터는 디플렉터 좌우 뒷전의 간격이 헬멧 모델의 좌우 뒷전 간격에 비해 줄어들지 않기 때문에 후류 영역을 수축시키지 못할 것이며 이러한 이유로 $q = 28^\circ$ 인 디플렉터에 비해 공기저항 감소 효과가 떨어지는 것으로 보인다. 본 연구에서는 디플렉터가 자유 유동과 나란한 경우($q = 0^\circ$)와 평면 윤곽선에 접하는 경우($q = 28^\circ$)를 대표적으로 살펴보았으며, 추후 디플렉터가 설치되는 각도가 항력에 미치는 영향을 좀 더 면밀히 연구한다면 항력 감소의 관점에서 최적의 설치 각도를 찾을 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 패러글라이딩 헬멧의 유동 특성을 기반으로 딥플과 디플렉터를 헬멧에 설치하여 공기저항을 감소시키는 것이 가능한지 알아보았다. 임계 레이놀즈 수 영역에서 초임계 레이놀즈 수 영역으로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 헬멧을

지나는 유동의 박리점이 하류로 이동하면서 후류 영역이 수축하고 그 결과 항력 계수가 감소하는 것을 확인하였다.

딴플은 임계 레이놀즈 수를 낮추는 효과가 뛰어나지만 초임계 레이놀즈 수 영역의 항력 계수를 낮추는 데는 한계가 있었다. 실제 패러글라이딩 비행 조건은 대부분 초임계 레이놀즈 수 영역에 속하기 때문에 딴플은 패러글라이딩 헬멧의 항력 저감 장치로 기능하기 어렵다. 골프공의 공기저항 감소에는 탁월한 효과를 갖는 딴플이 패러글라이딩 헬멧의 공기저항 감소에는 큰 효과를 발휘하지 못하는 이유는 골프는 아임계 레이놀즈 수 영역에서 경기가 진행되는 반면, 패러글라이딩은 초임계 레이놀즈 수 영역에서 주로 경기가 진행되기 때문이다.

디플렉터는 딴플과 달리 임계 레이놀즈 수를 거의 변화시키지 않았으며, 기울어진 각도에 따라 항력 저감 효과가 크게 달라졌다. 자유 유동과 나란하게 설치된 디플렉터는 초임계 레이놀즈 수 영역에서 딴플과 비슷한 공기저항 저감 효과를 보였으며, 헬멧의 평면 윤곽선에 접하도록 기울어진 디플렉터는 실제 비행 조건에서 항력 계수를 평균 7% 감소시켰다. 이는 디플렉터가 헬멧 모델 후류 영역의 크기를 수축시키고 동시에 후류 영역의 위치를 디플렉터 하류로 지연시키기 때문이며, 유동이 헬멧의 유동 박리점보다 하류에 위치한 디플렉터를 따라 흐르는 이유는 코안다 효과를 이용하여 설명할 수 있었다.

본 연구의 논의는 패러글라이딩 헬멧의 수평 평면 위 유동에 집중되었다는 한계를 갖는다. 패러글라이딩 헬멧은 평면과 측면의 형태가 서로 다른 3차원 형상임을 고려할 때 더욱 효과적인 항력 저감 장치를 개발하기 위해서는 수직 평면 위 유동에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한 패러글라이딩은 사이클링과 같은 스포츠와 비교할 때 훨씬 더 오랜 시간 동안 경기가 진행되기 때문에 공력 성능 향상을 위해 파일럿이 상체를 숙인 상태로 있기 어렵다. 따라서 헬멧과 파일럿 사이의 상호작용이 더욱 중요할 것으로 예상되며, 헬멧을 착용하는 파일럿의 자세에 따라 헬멧과 파일럿 사이의 상호작용이 어떻게 달라지는지에 대한 연구도 흥미로울 것이다.

후 기

본 연구는 문화체육관광부의 스포츠 선도기업 핵심기술개발사업(S202101-05-01-02)을 통해 국민체육진흥공단의 국민체육진흥기금을 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Babinsky, H., 1999, "The aerodynamic performance of paragliders," *Aeronaut. J.*, Vol.103(1027), pp.421-428.
- 2) Zverkov, I., Zanin, B., and Kozlov, V., 2008, "Disturbances growth in boundary layers on classical and wavy surface wings," *AIAA J.*, Vol. 46(12), pp.3149~3158.
- 3) "Paraglider, The structure of paragliding", Federation of Korea Aeronautics, "<http://www.fkaero.or.kr/>".
- 4) "Ozone Gliders; Exoceat Harness", Ozone Gliders Co.,Ltd, "<https://www.flyozone.com/paragliders/products/harnesses/exoceat/>".
- 5) Choi, J., Jeon, W. P., and Choi, H., 2006, "Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere," *Phys. Fluids.*, Vol. 18(4), 041702.
- 6) Ting, L. L., 2003, "Effects of dimple size and depth on golf ball aerodynamic performance," In *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Vol.36975, pp.811-817.
- 7) Achenbach, E., 1972, "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol.54(3), pp.565-575.
- 8) Bearman, P. W., and Harvey, J. K., 1976, "Golf ball aerodynamics," *Aeronaut. Q.*, Vol. 27(2), pp.112-122.
- 9) Kim, J., and Choi, H., 2014, "Aerodynamics of a golf ball with grooves," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P, J. Sports Eng. Technol.*, Vol. 228, pp.233-241.
- 10) Panitz, T., and Wasan, D. T., 1972, "Flow attachment to solid surfaces: the Coanda effect," *American Institute of Chemical Engineers Journals*, Vol. 18(1), pp.51-57.