원형 실린더 표면의 딤플 형상에 대한 수치 해석적 연구

A numerical study on dimple shapes over a circular cylinder

이혁¹*, 김익현², 사정환¹, 박수형¹, 변영환¹ 건국대학교 항공우주정보시스템공학과¹. KAIST 항공우주공학과²

초 록

Chowdbury. H.는 인체를 다수의 원형 실린더로 단순화하여 스키점프와 사이클 운동복의 항력계수를 각각 측정하였다. 이처럼 원형 실린더에 스피드 스케이팅 운동복을 씌운 모습과 골프공에서 사용하는 딤플의 2차원 형상이 서로 유사한 모양임을 착안하여, 2차원 원형 실린더 표면의 딤플이 유동 현상에 어떤 효과를 일으키는지 살펴보았다. 본 연구에서는 초기 형상을 토대로 3가지 딤플 형상 변수에 대한 매개변수 설정을 통해 항력계수를 비교하였다. 또한 3가지 딤플 형상 중 가장 낮은 항력계수를 갖는 딤플 형상에 대해서 요철 높이에 따른 항력계수를 비교하였다. 이를 통하여 딤플 형상이 각진 모양보다 등근 모양일수록 항력계수가 작은 것을 확인하였으며, 요철 높이를 제외한 모든 조건이 동일할 때 최적의 요철 높이가 존재할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : 스피드 스케이팅(Speed Skating), 원형 실린더(Circular cylinder), 딤플(Dimple), 항력계수(Drag Coefficient), 매개변수 연구(Parametric study)

1. 서 론

세계적인 선수들의 스피드 스케이팅 경기를 보면 아주 작은 차이에 의해 순위가 판가름 나는 경우가 많다. 이러한 차이에는 많은 요소(훈련방법, 영향섭취, 선수 개별 능력, 운동복, 장비 등)들이 복잡하게 얽혀있다. 본 논문에서는 여러 요소 중 스피드 스케이팅 선수들이 착용하는 운동복에 대한 공기역학적 항력계수 값을 비교하고자 한다. Gerard H. Kuper⁽¹⁾는 2002년 Salt Lake City 동계 올림픽에서 스피드 스케이팅 선수들이 착용한 유니폼이 실제 기록과 관계있음을 보였다. Len W. Brownlie⁽²⁾는 풍동 실험을 통해 실제 스피드 스케이팅 선수들이 착용하는 여러 회사 운동복의 항력을 측정하였다.

본 연구에서는 한국염색기술연구소의 도움을 받아 스피드 스케이팅 운동복의 단면(Fig. 1)을 관찰할 수 있었다. Chowdhury, H.⁽³⁾는 인체를 다수의 원형 실린더로 단순화하여 스키점프와 사이클 운동복의 항력계수를 각각 측정하였다. 이처럼 원형 실린더에 스피드 스케이팅 운동복을 씌운 모습은 골프공에서 사용하는 딤플(dimple)의 2차원 형상과 유사한 모양임을 알 수 있었다. 이 점에 착안하여 딤플 주변의 유동 특성을 EDISON_CFD를 통해 해석함으로써 항력계수를 낮출 수 있는 스피드 스케이팅 운동복에 대해연구하고자 한다.

따라서 본 논문에서는 기존의 스피드 스케이팅 유니폼에 대한 항력계수 값을 얻는데 그치지 않고, EDISON_CFD의 비압축성 유동 해석자를 이용하여 딤플의 주변 유동 특성에 대한 면밀한 고찰을 수행하였다. 3가지 딤플 형상에 대한 항력계수를 비교하였으며, 그 중 가장 낮은 항력계수의 딤플 형상에 대해 요철의 높이를 달리하여 연구를 진행하였다.

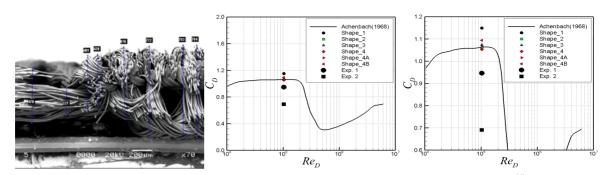


Fig. 1. 스피드 스케이팅 운동복의 단면

Fig. 2. 딤플 모양에 따른 레이놀즈수 - 항력계수 그래프(4)와 확대한 모습

2. 해석 조건 및 딤플 모양 정의

2차원 원형 실린더의 초기 형상과 본 연구에서 사용된 유동 조건은 각각 Table 1, 2와 같다. 레이놀즈수에 따른 항력계수를 나타낸 Fig. 2에서 Achenbach⁽⁴⁾의 값을 보면, $10^3 < Re < 3 \times 10^5$ 범위에서 항력계수(C_d)값은 거의 1 부근에 위치하는 것을 볼 수 있다.⁽⁵⁾ 딤플의 형상 변수에 대한 C_d 값을 비교하기위해 레이놀즈수가 위의 범위에 포함되도록 설정하였다. 본 연구에서 레이놀즈수는 풍속과 원형 실린더의 지름에 의해 값이 변한다. 풍속은 스피드 스케이팅 남자 500m 세계기록을 참고하여⁽⁶⁾ 15m/s로 설정하였다. 초기 형상의 원형 실린더 지름은 U.Butt⁽⁷⁾가 원형 실린더 표면의 변화에 대한 항력 감소를 나타내기 위해 설정한 원형 실린더 지름과 한국염색기술연구소에서 측정한 옷감의 단면 높이를 참고하여,위의 레이놀즈수 범위에 맞게 0.1026m로 설정하였다.

본 연구에서 사용한 딤플 모양은 Fig. 3과 같다. 딤플 모양에 따른 원형 실린더 표면의 특성은 Table 3에 나타냈으며, 딤플 모양에 대한 매개변수로 4가지 변수(b, c, k, d)를 설정하였다. b는 볼록한 부분(凸)의 너비를 나타내며, c는 오목한 부분(凹)의 너비, k는 요철 높이를 나타낸다. 마지막으로

Table 1. 원형 실린더의 초기 형상 조건⁽¹⁾

Туре	원형 실린더 지름(m)	옷감 단면의 높이(m)	총 지름(m)
Smooth 0.1		0.0013	0.1026

Table 2. 원형 실린더 주위의 유동 조건⁽²⁾

유체	온도(℃)	기압(hPa)	밀도 (kg/m^3)	점성계수 $(kg/m \cdot s)$	풍속 (m/s)	레이놀즈수(Re)	받음각(°)
공기	12	1017	1.2377	1.797×10^{-5}	15	1.03×10^{5}	0

Table 3. 딤플 모양에 따른 원형 실린더 표면의 특성⁽³⁾

Туре	shape of dimple	b/d	c/d	k/d	k/c
Shape_1	no dimple	0	0	0	0
Shape_2	Trapezoid				
Shape_3	Cone	0.0229	0.0084	0.0042	0.5052
Shape_4	Arc				
Shape_4_A	Arc	0.0229	0.0084	0.0062	0.7373
Shape_4_B	Aic	0.0229	0.0064	0.0023	0.2732













Fig. 3. 딤플 모양에 따른 격자



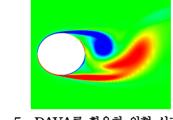


Fig. 4. 격자의 형상

Fig. 5. eDAVA를 활용한 원형 실린더의 모습

d는 원형 실린더 초기 형상의 총 지름을 나타낸다. Shape_1은 덤플이 없는 원형 실린더의 초기 형상을 나타내며, Shape_2, 3, 4는 덤플 형상을 제외한 모든 변수들을 동일하게 놓고, 초기 형상(Shape_1)을 토대로 덤플 모양을 설정하였다. Shape_4_A, B는 요철 높이를 제외한 모든 변수들을 동일하게 놓고, 3가지 덤플 형상 중 가장 낮은 항력계수를 가진 Arc 형상(Shape_4)을 토대로 요철 높이를 설정하였다. 덤플모양에 따른 레이놀즈수와 항력계수를 나타낸 Fig. 2에서 Exp. 1, 2는 본 연구실의 풍동 실험실에서 측정한 값이다. Exp. 1은 초기 형상(Shape_1)의 원단을 사용했으며, Exp. 2는 사다리꼴 형상(Shape_4)과 유사한 덤플 형상의 원단을 이용하였다.

CFD 해석을 위해 사용한 격자를 Fig. 4에 나타내었다. Farfield는 원형 실린더 중심에서 $48.73D(\approx 5)$ 의 길이로 설정하였으며, First cell distance는 1×10^{-5} 이다. 원형 실린더 표면의 딤플 모양(Fig. 3)을 묘사하기 위해 일반적인 원형 실린더 유동 해석보다 많은 격자점을 사용했으며, 따라서 격자의 총 개수는 1001×249 이다. 딤플의 모양은 3.6° 마다 반복되게 구성하였으며, 따라서 총 100개의 딤플이 실린더의 표면에 규칙적으로 배열되어 있다. 형상은 총 5개의 다중블록으로 구성되었으며, 비압축성 유동의 다중 블록용 해석자인 2D_Incomp-2.1_P를 사용하였다. 비정상 난류 유동(Unsteady turbulent flow)으로 가정했으며, 비정상 유동이므로 실린더 형상의 공력계수를 확인할 수 있도록 시간 간격(Δt)은 0.01, 무차원한 시간으로 50까지 계산을 진행하였다.

3. 초기 형상(Baseline) 해석

원형 실린더의 초기 형상을 EDISON_CFD로 해석한 값(Shape_1)과 본 연구실의 풍동 실험실에서 측정한 실험값(Exp. 1)을 아래의 Table 4에 나타내었다. 해석한 값과 실험값, Achenbach, E. $^{(4)}$ 의 값을 Fig. 2를통해 비교해보았다. Achenbach, E. $^{(4)}$ 의 값을 기준($Re=1.03\times10^5$ 일 때, $C_d\approx1.06$ 으로 설정)으로 오차율을 계산해보았다. 해석 값과 실험값 모두 10% 정도의 오차율을 보였지만, 딤플의 모양에 따른 항력계수를 비교하기 위한 본 연구의 타당성에는 큰 무리가 없어 보인다.

Table 4. 초기 형상의 항력계수⁽⁴⁾

Cd Type	Min	Max	Mean	오차율(%)
Shape_1	1.0854	1.2711	1.1783	10.81
Exp. 1	0.9082	0.9826	0.9454	11.16

4. 딤플 형상에 따른 유동 특성 해석

4.1. 딤플 형상에 따른 유동 특성 해석

딤플 형상에 따른 항력계수(Table 5)를 통해 3가지 딤플 형상의 C_d 는 초기 형상(Shape_1)의 C_d 보다 모두 작은 것을 볼 수 있다. Table 5에서 감소율은 초기 형상의 항력계수 평균값을 기준으로 계산하였으며, $6\sim8\%$ 정도 감소하는 것을 볼 수 있다. 딤플의 존재는 딤플 내부에서 생성된 와류(Vortex)가 딤플 주위의 유동 흐름에 영향을 주는데, 딤플 형상에 따른 유선을 나타낸 Fig. 6을 통해 상세히 알 수 있다. 난류는 충류에 비해 더 많은 운동 에너지와 운동량을 갖고 있으므로, 역압력구배 영역에서 유동 입자들이 실린더의 하류 쪽으로 더 움직일 수 있도록 한다. 따라서 유동의 박리점(separation point)은 원형 실린더의 하류 쪽으로 이동하게 되며, 유동박리에 의해 발생하는 압력 저항의 값도 작아지게 된다.

딤플 형상에 따른 각도와 압력계수를 나타낸 Fig. 7을 보면, 각도가 90도 이상이 되면 C_p 의 값이 일정한 것을 볼 수 있다. 초기 형상(Shape_1)과 Arc 형상(Shape_4)의 C_p 가 일정하게 되는 지점의 각도를 비교하면 초기 형상의 각도가 더 작은 것을 알 수 있다. 이를 통해 Shape_4의 박리점이 Shape_1보다 더 하류에 위치한다는 것을 알 수 있다. 또한 back pressure coefficient의 절댓값은 Shape_4가 Shape_1보다 작은 것을 볼 수 있으며, 항력계수가 작은 순서대로 back pressure coefficient의 절댓값이 작은 것을 볼 수 있다. 압력계수 최솟값의 절댓값은 Shape 4가 Shape 1보다 큰 것을 볼 수 있다. 비압축성 유동에서

Max	Mean	Amplitude	감소율(%)
1.2711	1.1783	0.0928	_
1.1669	1.0864	0.0805	7.8

Table 5. 딤플 형상에 따른 항력계수⁽⁵⁾

7/////	///////
	Shape 1 Δy ₁ =1.0×10 ⁻⁵
	25, 1.0.10

Cd

Type

Shape_1 Shape 2

Shape 3

Shape 4

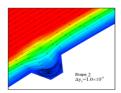
Min

1.0854

1.0059

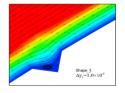
1.0171

1.0000



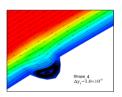
1.1860

1.1594



1.1015

1.0796



6.5

8.4

0.0844

0.0797

Fig. 6. 딤플 형상에 따른 유선

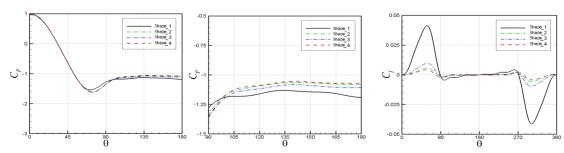


Fig. 7. 딤플 형상에 따른 각도 - 압력계수 그래프 Fig 8. 각도 - 표면마찰 항력계수 그래프 Table 6. 딤플 유무에 따른 실험값과 해석 값⁽⁶⁾

Cd Type	Min	Max	Mean	Amplitude	감소율(%)
Exp. 1	0.9082	0.9826	0.9454	0.0372	_
Exp. 2	0.6662	0.7150	0.6906	0.0244	27.0
Shape_1	1.0854	1.2711	1.1783	0.0928	_
Shape_2	1.0059	1.1669	1.0864	0.0805	7.8

 $C_p = 1 - (\frac{V}{V_\infty})^2$ 으로 나타낼 수 있으므로, 박리점 이전에 원형 실린더 표면의 유동 속도는 압력계수 최 솟값의 절댓값이 큰 Shape_4가 Shape_1보다 빠르다는 사실을 알 수 있다.

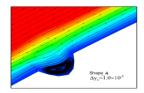
Fig. 7과 딤플 형상에 따른 각도와 표면마찰 항력계수를 나타낸 Fig. 8을 보면 C_f 의 최댓값과 C_p 의 최솟값의 각도가 비슷한 것을 볼 수 있다. 비압축성 유동에서 C_p 의 최솟값은 원형 실린더 표면의 유동 속도가 제일 빠른 지점이다. C_f 는 경계층의 속도 프로파일에서 속도구배와 관련이 있으므로 원형 실린더 표면의 유동 속도가 제일 빠른 C_p 의 최솟값 지점에서 C_f 의 최댓값을 얻을 수 있다. 또한 Fig. 8을 보면 C_f 이도 C_f 0도 C_f 1의 합의 법위에서 Shape_1의 C_f 1와이 다른 딤플 형상보다 큰 것을 볼 수 있다. 그 이유는 딤플이 없는 Shape_1과 달리 다른 딤플 형상들은 딤플 내부에서 와류가 생기기 때문에 본래 유동의 방향과 반대 방향으로도 움직인다. 따라서 표면마찰 항력의 부호가 반대가 되어 전체 표면마찰 항력의 일부를 상쇄시키기 때문이다. 또한 EDISON_CFD를 이용하여 C_f 1와을 해석할 때 딤플 형상으로 인해 C_f 1와이 요동(fluctuation)치므로, 따라서 Fig. 8은 C_f 1와 중 frequency가 낮은 성분만을 뽑아낸 결과이기 때문이다. C_f 1와이 작은 순서대로 C_f 1와도 작아지는 것을 볼 수 있는데 이를 통해 딤플의 존재는 압력 저항 뿐만 아니라 표면마찰 항력도 작게 만드는 것을 알 수 있다.

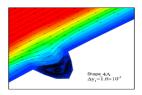
4.2. 풍동 실험실에서 측정한 실험값과 CFD를 이용한 해석 값의 비교

초기 형상(Shape_1)과 사다리꼴 형상(Shape_2)에 대한 실험값과 해석 값을 Table 6에 나타내었다. 감소율은 실험값과 해석 값 각각 초기 형상의 항력계수 평균값을 기준으로 계산하였다. 두 방법의 감소율에서 정량적 차이는 존재하지만, 딤플에 의해 항력계수가 감소한다는 사실을 확인할 수 있었다.

Table 7. 요철 높이에 따른 항력계수⁽⁷⁾

Cd Type	Min	Max	Mean	Amplitude	증가율(%)
Grid_4	1.0000	1.1594	1.0796	0.0797	_
Grid_4_A	1.0120	1.1772	1.0946	0.8261	1.4
Grid 4 B	1.0336	1.2103	1.1219	0.8835	3.9





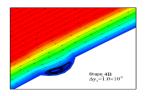


Fig. 9. 요철 높이에 따른 유선

5. 요철 높이에 따른 유동 특성 해석

요철 높이에 따른 항력계수를 나타낸 Table 7을 통해 Shape_4가 요철 높이를 달리한 Shape_4_A, B보다

 C_d 값이 더 작은 것을 볼 수 있다. 이는 요철 높이를 제외한 모든 변수들이 동일한 경우, 최적의 요철 높이가 존재할 수 있음을 의미한다. Table 7에서 증가율은 $Shape_4$ 의 항력계수 평균값을 기준으로 계산 하였으며, $1\sim4\%$ 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 요철 높이에 따른 각도와 압력계수를 나타낸 Fig. 10을 보면 앞서 딤플 형상에 따른 각도와 압력계수를 나타낸 Fig. 7의 그래프와 동일한 경향성을 가지는 것을 볼 수 있다. 요철 높이에 따른 각도와 표면마찰 항력계수를 나타낸 Fig. 12도 위의 딤플 형상에 따른 각도와 표면마찰 항력계수를 나타낸 Fig. 12도 위의 딤플 형상에 따른 각도와 표면마찰 항력계수를 나타낸 Fig. 8과 동일한 경향성을 가지는 것을 볼 수 있다.

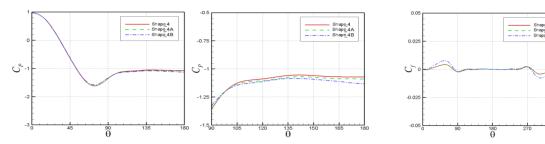


Fig. 10. 요철 높이에 따른 각도 - 압력계수 그래프 Fig 11. 각도 - 표면마찰 항력계수 그래프

5. 결 론

본 연구에서는 원형 실린더의 CFD 해석을 통해 딤플의 형상에 따른 유동 해석을 나타내었다. 그 결과, 원형 실린더에 딤플이 존재함으로서 항력계수가 작아진다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 딤플로 인해 압력저항뿐만 아니라 표면마찰 항력도 줄어든다는 결론을 내릴 수 있었다. 딤플 형상을 제외한 모든 변수들이 동일한 경우, 각진 모양보다 둥근 모양일수록 항력계수 값이 작아진다는 사실을 알 수 있었다. 다음으로 3가지 딤플 형상 중 항력계수가 가장 낮은 Arc 형상에 대한 요철 높이에 따른 유동 해석을 나타내었다. 요철 높이 외에 모든 조건이 동일한 경우, 최적의 요철 높이가 존재할 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후 정밀한 계산을 수행하여 딤플의 모양과 항력계수를 낮출 수 있는 스피드 스케이팅 운동복과의 관계를 심화해서 연구할 계획이다.

6. 후 기

본 연구에서 스피드 스케이팅 운동복의 단면(Fig. 1)에 대한 사진을 제공해주신 한국염색기술연구소 김미경 연구원님께 감사드립니다. 본 연구는 미래창조과학부의 지원 사업인 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gerard H. kuper, Elmer sterken, 2008, "Do skin suits increases average skating speed?", Sports Tech., pp. 189~195.
- (2) Len W. Brownlie, Chester R. Kyle, 2012, "Evidence that skin suits affect long track speed skating performance", 9th conference of the International Sports Engineering Association, pp. 26-31.
- (3) Chowdhury, H., 2012, "Aerodynamics of sports fabrics and garments", School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering RMIT Univ., Australia.
- (4) Achenbach, E., 1968, "Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^6$ ", J. Fluid Mech. 34, pp. 625~639.
- (5) John D, Anderson, 2002, "Fundamentals of aerodynamics", 5th edition, McGraw-Hill, New York.
- (6) http://isuprod.blob.core.windows.net/media/100305/current-world-cup-records-18-nov-2013.pdf
- (7) U. Butt, L. Jehring, C. Egbers, 2015, "Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface", International Journal of Heat and Fluid Flow, pp.128~134.