

봅슬레이의 형상변화가 공력성능에 미치는 영향[§]

심현석** · 정효연* · 김준희** · 김광용****[†]

* 인하대학교 기계공학과, **인하대학교 대학원 기계공학과, *** 인하대학교 기계공학부

Effects of Geometric Parameters of a Bobsleigh on Aerodynamic Performance

Hyeon-Seok Shim **, Hyo-Yeon Jung *, Jun-Hee Kim ** and Kwang-Yong Kim ****[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Undergraduate school, Inha Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Graduate school, Inha Univ.,

*** Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received January 29, 2015 ; Revised May 4, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

Key Words: Aerodynamic Performance(공력성능), Bobsleigh(봅슬레이), Drag Coefficient(항력계수), Reynolds-Average Navier-Stokes Equations(레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

초록: 본 연구에서는 다양한 형상변수들이 봅슬레이의 공력성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stoke 해석을 수행하였으며, 난류모델로는 표준 k-ε 모델이 사용하였다. 격자계로는 비정렬 사면체 격자를 사용하였다. 성능 평가를 위한 형상변수로는 전방범퍼의 장축의 길이, 범퍼의 높이, 그리고, 카울링 측면과 정면 각각에서의 곡률반경 등 네가지 변수를 설정하였으며. 이들이 공력성능으로 선정된 항력계수에 미치는 영향을 평가하였다. 해석결과, 범퍼의 높이와 카울링 측면의 곡률반경이 항력계수에 민감한 영향을 미침을 알 수 있었다.

Abstract: Analysis of the aerodynamic performance of a bobsleigh has been performed for various types of bobsleigh body shape. To analyze the aerodynamic performance of the bobsleigh, three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stoke equations were used with the standard k-ε model as a turbulence closure. Grid structure was composed of unstructured tetrahedral grids. The radii of curvature of cowling, and height and length of front bumper at the tip on the drag coefficient were selected as geometric parameters. And, the effects of these parameters on the aerodynamic performance, i.e., the drag coefficient, were evaluated. The results shows that the aerodynamic performance is significantly affected by the height of front bumper and radius of curvature.

1. 서론

봅슬레이(Bobsleigh)는 특수한 형태의 썰매를 타고 얼음으로 이루어진 좁고 복잡한 트랙을 빠른 속도로 활강하는 동계올림픽 종목 중 하나로서, 최근 2014년 소치 동계 올림픽에서의 국가대표팀의 선전에 힘입어 국민적 관심이 증대되고 있다. 봅슬레이의 경기기록을 좌우하는 요소는 선수들의 경기력, 러너(Runner)의 마찰 손실 등 여러 요인이 있으나 그 중 가장 중요한 요소 중 하나는 봅슬레이 본체에 작용하는 공기저항이다. 최근 성공적 모델개발의 사례로는 2014년 소치 동계올림픽에서 미국 팀의 봅슬레이 개발사례이다. BMW에 모델개발을 의뢰하여 공력설계를 통하여 독자적인 봅슬레이 형상모델을 구축한

§ 이 논문은 제6회 전국 대학생 유체공학 경진대회(2014. 11. 13., 김대중컨벤션센터) 발표논문임

† Corresponding Author, kykim@inha.ac.kr

미국은 1952년 이후 처음으로 메달 3개를 획득하는 성적을 이루었다.

봅슬레이의 기록 향상을 위한 최근의 연구는 주로 풍동 실험을 통한 본체 주위의 유동 분석과 전산유체역학(CFD)을 활용해 다양한 봅슬레이 형상에 대해 유동해석을 하는 방식으로 진행되고 있다. Berton 등⁽¹⁾은 실제 프랑스 봅슬레이 국가대표팀 선수들의 탑승 배치 순서를 바꾸어 가며 풍동실험을 한 결과 항력을 감소시키는 최적의 선수배치를 도출해 내어 그 해 올림픽에서 5등의 결과를 얻었고, Chowdhury 등⁽²⁾은 1/2 축소 모형 풍동 실험을 통해 봅슬레이 표면의 유동 현상을 가시화하는 연구를 수행하여 형상 변화가 주행성능에 영향을 미치는 정도를 제시하였다. 또한, Lewis⁽³⁾는 수치해석과 풍동 실험을 통한 결과를 바탕으로 항력 저감을 위한 다양한 방법을 제시하였다.

위에 언급한 봅슬레이의 공기역학적 항력저감에 대한 이전의 연구들은 시험된 변수들이 한정되어 봅슬레이의 형상을 최적화하는 수준에는 미치지 못하고 있다. 따라서 다양한 형상 변화가 공력성능에 미치는 영향을 평가하기 위해서 좀 더 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 국제 봅슬레이 연맹(FIBT)의 규정⁽⁴⁾을 만족하도록 선정된 봅슬레이 형상을 바탕으로 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 수행하고 이를 토대로 봅슬레이 동체의 다양한 형상 변수들이 공력성능에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 FIBT의 규정을 고려하여 기준 봅슬레이 형상 (2인승, 탑승자 포함한 형상)을 선정하였으며 봅슬레이 외부 유동장의 삼차원 수치해석을 수행하기 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS-CFX 15.0⁽⁵⁾을 사용하였다. 해석에 사용된 계산영역과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다. 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였으며 작동유체는 경기가 진행되는 장소의 온도와 경기 시간을 고려하여 0°C의 이상기체로 가정하였다. 입구조건으로 속도를 주행 평균 속도인 35m/s로 가정하였고, 출구조건은 대기압 조건을 부여하였으며, 모든 벽에 점착조건과 단열조건을 사용하였다. 또한 계산시간의 절감을 위해 대칭면을 기준으로 하여 대칭조건을 부여하였다.

난류모델로는 수치적으로 강건하다고 밝혀진 바 있어 다양한 유동해석에 보편적으로 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며,^(5,6) Lewis⁽³⁾는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용한 봅슬레이 유동의 수치해석 결과가 풍동 실험 결과와 비교적 일치함을 보여줌으로서 그 타당성을 입증하였다. ANSYS ICEM-CFD 15.0⁽⁷⁾을 사용하여 해당 난류모델에 적합하게 구성한 비정렬 사면체 격자계를 Fig. 2에 나타내었다. 경계층에서의 정밀한 유동해석을 위하여 봅슬레이 표면에 프리즘 격자를 구성하였고, 벽 근처 영역에서 실험적

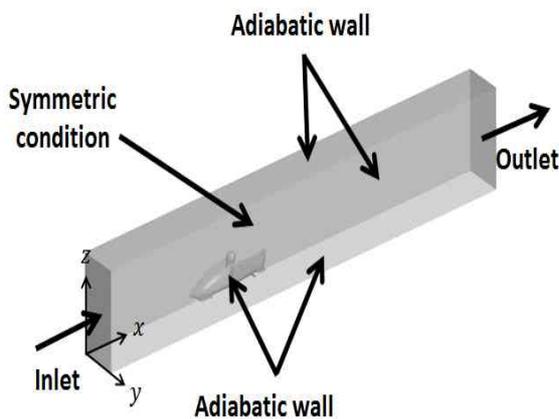


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

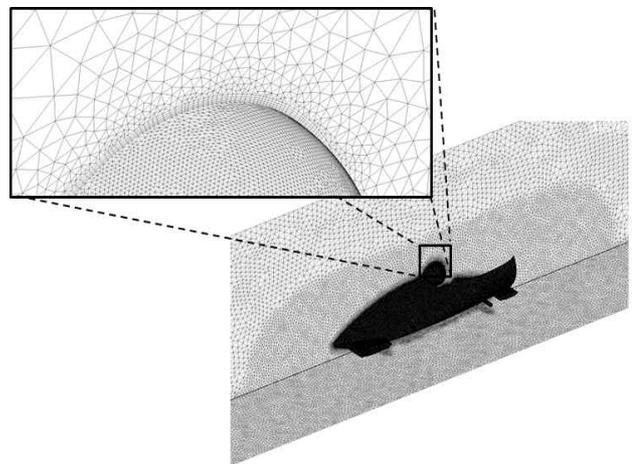


Fig. 2 Computational grids and prism layer

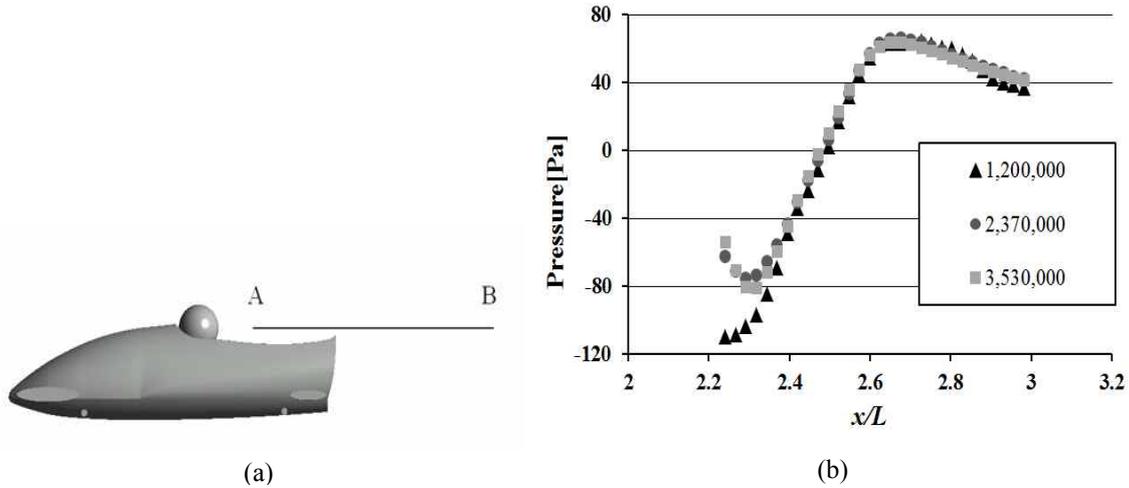


Fig. 3 Grid-dependency test for pressure distribution on line A-B

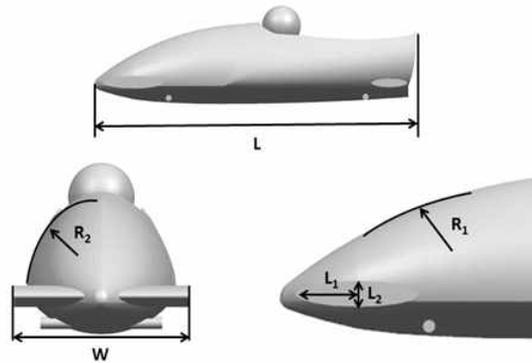


Fig. 4 Definition of the geometric variables

인 벽합수를 사용하기 위해 첫 번째 프리즘 격자의 y^+ 값은 20 이상, 200 이하가 되도록 유지시켰다. 또한 형상 부근과 박리영역에는 격자를 조밀하게 구성하여 유동의 정확한 예측을 가능하게 하였다. Fig. 3(a)는 사용된 뿔슬레이의 형상을 나타내며 Fig. 3(b)는 격자수에 대한 해석결과의 의존성을 배제하기 위하여 격자의존성 테스트를 수행한 결과로 Fig. 3(a)에 나타낸 임의의 선 A-B 상에서의 정압 분포를 나타내고 있다. 약 120만개에서 353만개까지 격자수를 변화시켜가며 테스트를 수행한 결과 237만개와 353만개 격자의 정압 분포는 비교적 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과를 바탕으로 237만개를 계산에 사용될 최적격자로 선정하였다.

3. 성능함수 및 형상변수

뿔슬레이의 공력성능을 측정하기 위해 항력계수인 C_D 를 성능함수로 정의하였으며, C_D 의 정의는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A_p U_\infty^2} \quad (1)$$

Table 1 Dimensions of reference geometry

$L_{1,ref}/W$	0.30
$L_{2,ref}/W$	0.12
$R_{1,ref}/L$	0.80
$R_{2,ref}/L$	0.16
L	2.70 m
W	0.86 m

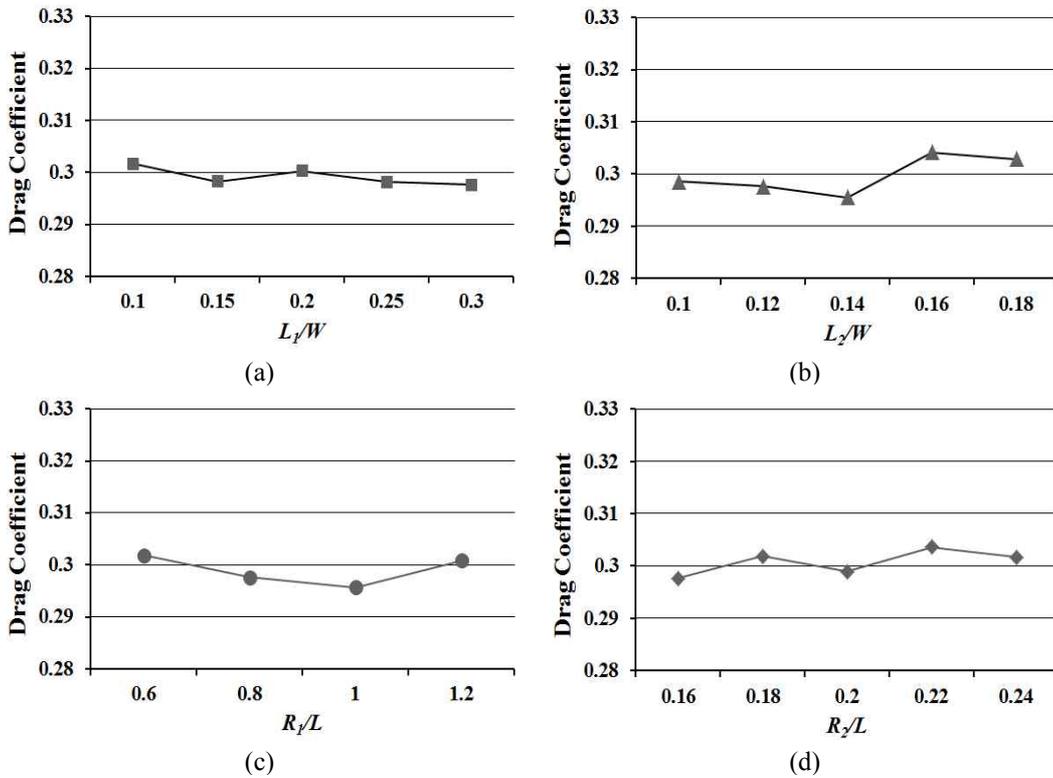


Fig. 5 Effects of geometric variable on the drag coefficient; (a) $L_1/W=0.1-0.3$, (b) $L_2/W=0.1-0.18$, (c) $R_1/L=0.6-1.2$, (d) $R_2/L=0.16-0.24$

D는 유동방향으로 본체에 작용하는 항력을 나타내고, ρ , U^∞ , AP는 각각 공기의 밀도, 외부유동의 속도, 유동방향에 수직한 투영면적을 나타낸다.

항력저감 정도를 비교하기 위해 고려한 4가지의 형상변수와 기준형상의 크기를 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다. L 은 흡슬레이의 총 길이, W 는 전방범퍼의 폭을 나타내며 형상변수인 L_1 , L_2 , R_1 , R_2 는 각각 타원형 전방범퍼의 전방 장축의 길이, 범퍼의 높이, 카울링(Cowling) 측면, 정면에서의 곡률반경을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞 절에서 선정된 네 가지 형상변수들이 흡슬레이의 공력성능에 미치는 영향을 삼차원 RANS해석을 통해 알아보았다. Fig. 5는 각 형상 변수들이 항력계수에 미치는 영향을 그래프로 나타낸

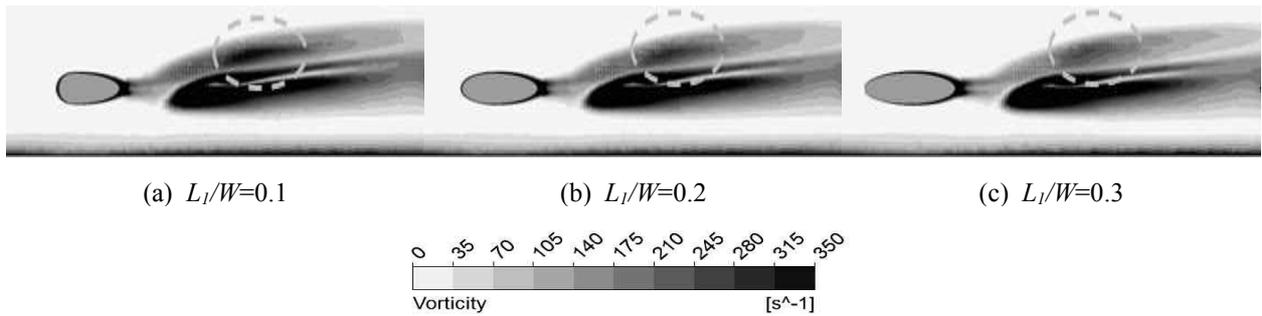


Fig. 6 Vorticity distribution at x - z plane ($y/W=0.9$)

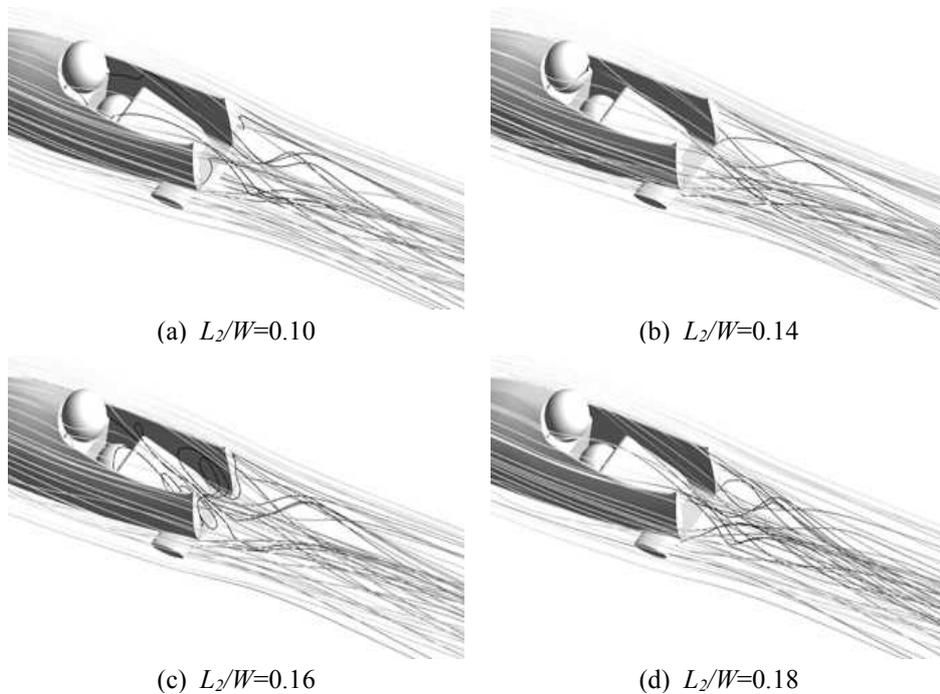


Fig. 7 Streamlines passing through the bobsleigh

것이다. Fig. 5(b)와 (c)에서는 형상 변화에 따른 항력계수의 변화가 비교적 크게 나타나고 주어진 형상 변수 범위 내에서 항력계수의 단순 최소치가 존재함을 알 수 있다. L_2/W 의 경우, $L_2/W=0.14$ 일 때 최소항력을 가짐을 알 수 있고 이 때 항력계수는 0.2955로, 최대값을 가지는 지점인 $L_2/W=0.16$ 에서의 항력계수 0.3042와 비교하여 2.94%의 공력성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 R_1/L 의 경우에는 $R_1/L=1$ 일 때의 항력계수는 최소값인 0.2957이며, $R_1/L=0.6$ 일 때의 최대값인 0.3018과 비교하였을 때, 2.06% 향상된 결과를 보여주었다. 한편, Fig. 5(a)의 경우, 형상변수의 수치가 증가함에 따라 항력계수가 전반적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 감소폭은 1.38%로 다른 변수들에 비해 공력성능에 미치는 영향이 크지 않았다. Fig. 5(d)의 경우, 형상 변수가 감소함에 따라 항력계수가 전반적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 이 경우 최소항력계수는 0.2976, 최대항력 계수는 0.3036으로 감소폭은 2.02%이다.

Fig. 6은 형상변수 L_1/W 의 변화에 따른 x - z 평면 ($y/W=0.9$)에서의 와도 (vorticity) 분포를 보여주고 있다. 모든 형상에서 유동장이 전방범퍼로 인해 형성된 상부의 와류와 카울링의 영향으로 인해 생성된 하부의 와류로 구성되어 있는 것을 공통적으로 확인할 수 있다. $L_1/W=0.1$ 의 경우, 전방범퍼의 길이가 짧아짐에 따라 하부 와류의 분포는 별다른 차이가 없었으나, 상대적으로 앞부분이 뭉툭해진 범퍼의 영향으로

$L_1/W=0.2$ 와 0.3 에 비해 상부 와류의 세기가 증가한 것이 관찰되었다.

형상변수 L_2/W 의 변화에 따른 볼슬레이 후류에서의 유선분포를 Fig. 7에서 나타내었다. $L_2/W=0.14$ 의 경우, 동체를 지나는 유선이 형상의 영향을 많이 받지 않고 완만한 분포를 나타낸다. 따라서 주행에 커다란 영향을 받지 않으므로 가장 낮은 항력계수를 가진다. 반면, $L_2/W=0.16$ 의 경우, 두꺼워진 범퍼로 인하여 cut-off 내부로 유입된 유동으로 인해 박리영역이 탑승자의 등 뒷부분에서부터 시작되어 cut-off 내부 영역에서 매우 복잡한 유동이 유발되는 것을 확인하였다. 이러한 유동은 후류에서의 압력손실을 증가시켜 공력성능에 부정적인 영향을 미치는 요인으로 사료된다.

Fig. 8은 R_1/L 의 변화에 따른 대칭면($y=0$)에서의 압력계수 분포를 보여준다. 공통적으로 유동과 직접적으로 충돌하는 탑승자 머리 앞부분에는 압력이 높고 머리 뒷부분에서는 빠른 유동속도로 인해 압력이 다른 곳에 비해 상대적으로 낮은 것으로 관찰되었다. 이로 인하여 압력이 높은 볼슬레이 전면부와 유동이 박리된 후면부 사이의 압력차로 인하여 비교적 큰 압력 항력이 작용한다. $R_1/L=0.6$ 의 경우, 탑승자 머리 전면부에서 상대적으로 높은 압력계수 분포를 보이는 것이 관찰되었고, 상대적으로 변화가 크지 않은 후면부와의 압력차를 비교하였을 때 이는 상대적으로 높은 항력계수를 가지는 원인이 된다.

R_2/L 의 변화에 따른 x 축 단면($x/L=2.55, 2.75, 2.95, 3.05$)에서의 후류의 속도분포와 벡터를 Fig. 9에 나타내었다. R_2/L 가 증가할수록 $x/L=2.55$ 에서 후류가 넓은 유동손실 영역을 가짐을 확인할 수 있고, 유동의 회복정도 역시 느린 것이 관찰되었다. 이러한 상대적으로 큰 유동 손실은 볼슬레이 동체 전후의 압력차를 증가시켜 공력성능을 감소시키는 요인이 된다. 또한, 전체적으로 후류에서 강하게 생성된 와류가 지면방향으로 향하는 현상이 관찰되었고, 이는 자유흐름에 평행한 방향으로 유도항력을 발생시켜 공력성능에 부정적인 영향을 미친다.

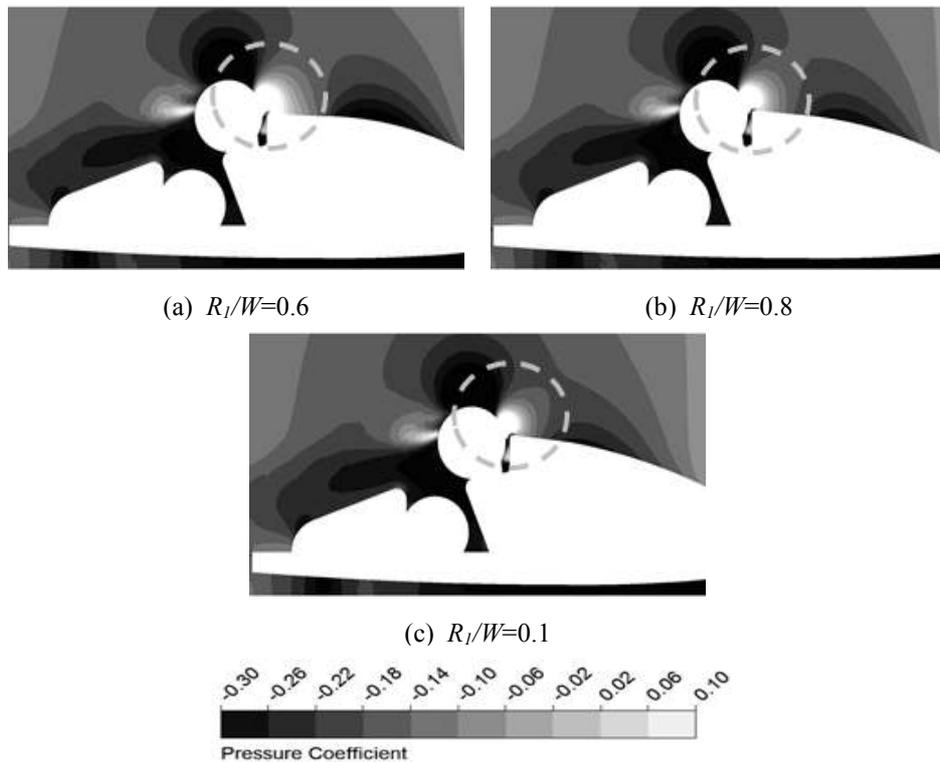


Fig. 8 Distribution of pressure coefficient on the $x-z$ plane ($y=0$)

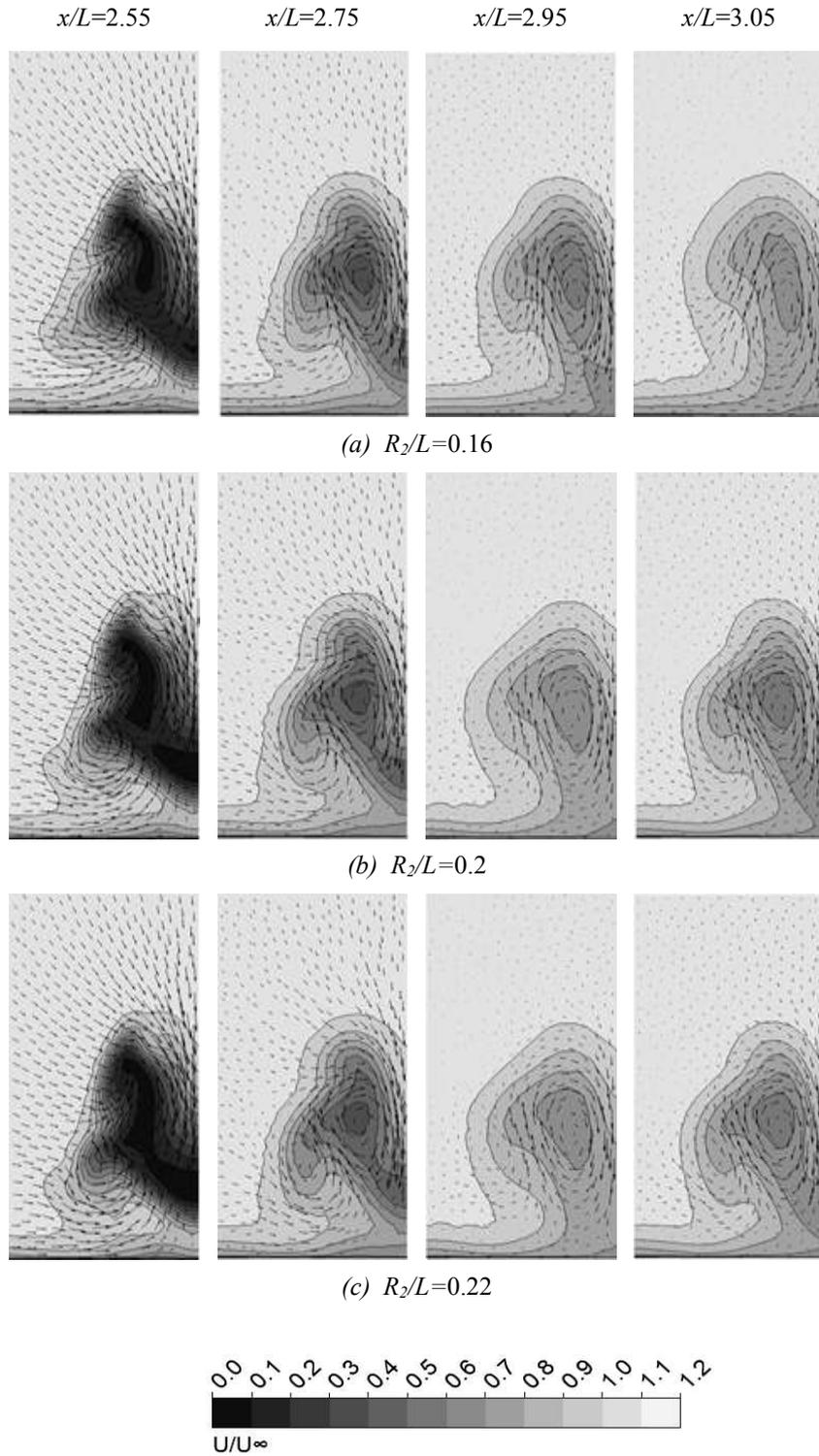


Fig. 9 Velocity contour and vectors on axial cutting planes (y-z plane)

5. 결 론

본 연구에서는 복슬레이의 외부 유동에 대해 삼차원 RANS 해석을 수행하였다. 공력성능으로 선정된 항력계수에 대한 형상변수의 영향을 알아보기 위해 네 가지의 형상 변수, 타원형 범퍼의 전방 장축의

길이, 범퍼의 높이, 카울링 측면과 정면 각각에서의 곡률반경이 선정되었으며, 총 16개의 형상에 대하여 결과를 도출하였다. 범퍼의 높이나 카울링 측면 곡률반경을 변경한 경우, 형상 변화에 대한 공력성능의 변화가 크게 나타나고 주어진 설계 범위 내에 최소의 항력계수를 가짐을 확인할 수 있었으며, 각각 최대항력 대비 2.94%와 2.06%의 항력 감소율을 얻을 수 있었다. 카울링 정면 곡률반경의 경우 곡률반경이 증가함에 따라 항력계수 역시 증가하는 경향을 보였고 최대항력계수 대비 항력계수 감소율은 2.02%이며, 기준 형상이 가장 낮은 항력계수를 가진다. 반면, 범퍼 장축의 길이의 경우에는 길이가 길어짐에 따라 항력계수가 감소하는 경향을 보였으나, 범위 내 변화율은 1.36%로 비교적 큰 영향을 주지 않는다. 본 연구를 통해 봅슬레이 주요 구성요소의 형상 인자가 공력성능에 미치는 영향을 살펴보았으며, 향후 연구에서는 헬멧 형상, 블레이드 러너 그리고 봅슬레이 선수의 자세 등과 같은 추가적인 형상 변수를 선정하여 이를 통해 봅슬레이의 공력성능을 최대화 할 수 있는 형상 최적설계를 수행할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌 (References)

- (1) Berton, E., Favier, D., Agnès, A. and Pous, F., 2004, "Aerodynamic Optimization of a Bobsleigh Configuration", *International Journal of Applied Sports Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~13.
- (2) Chowdhury, H., Alam, F., Arena, S. and Mustary, I., 2013, "An experimental study of airflow behaviour around a standard 2-man bobsleigh", *6th Asia-Pacific Congress on Sports Technology (APCST)*, Vol. 60, pp. 479~484.
- (3) Lewis, O., 2006, "Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh", *Master of Science Thesis*, TU Delft, Netherlands.
- (4) International Rules, 2005, FIBT.
- (5) CFX-15.0 Solver Theory, 2013, Ansys Inc.
- (6) B.E. Launder and D.B. Spalding, 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp.269~289.
- (7) ICEM CFD-15.0, 2013, Ansys Inc.