

알파인 스키 활강 선수에 작용하는 공기 저항 예측

김 종 수,¹ 조 태 수,² 안 형 택*¹

¹울산대학교 조선해양공학부

²울산대학교 스포츠과학부

CFD PREDICTION OF AERODYNAMIC DRAG ACTING ON ALPINE DOWNHILL SKIER

J.S. Kim,¹ T.S. Cho² and H.T. Ahn*¹

¹School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Ulsan

²School of Exercise and Sports Science, Univ. of Ulsan

In speed skiing, aerodynamic forces play an important role in determining performance of the skier. To predict aerodynamic effects of the posture of the skier on alpine downhill skiing, we constructed equation of motion of the skier and performed the corresponding CFD simulations. Comparing drag and lift of three different skier postures, it has been shown that drag decreases significantly by tucking upper body to lower body and stretching arms forward. Also, aerodynamic lift which worked as downforce in standing posture worked upward in tuck posture, reducing friction force between snow and ski. This indicates that tuck posture have advantages over standing posture in dual mechanism, namely by reducing drag and also increasing lift. By this two-dimensional initial study we could reveal the general tendency of the aerodynamic force over the skier's body. This study not only provides a theoretical foundation for the athletes to understand the aerodynamic effects of skier postures but also shed a light on towards more accurate and rational three-dimensional CFD simulation of skiers in the near future study.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 난류유동(Turbulent Flow), 스키(skiing), 활강(Downhill), 운동역학(Sports Biomechanics)

1. 서 론

알파인 스키는 속도가 빠른 순으로 활강, 수퍼 대회전, 대회전, 회전 등의 종목으로 이루어져 있다. 상대적으로 속도가 가장 느린, 회전(Slalom) 경기는 정해진 코스를 따라 내려오며 설치된 기문(Gate)을 통과하는 종목으로서, 다른 종목들에 비해 기문의 수가 많고 기문 사이의 간격이 좁기 때문에 빠르고 짧은 회전이 필수적으로 요구되는 종목이다. 반면, 활강(Downhill) 경기는 스키 선수들이 출발선에서 시작하여 평균 경사각이 약 17° 정도의 경사면을 90 ~ 140 km/h의 속력으로 경승선에 도달하는 데에 걸리는 시간을 경쟁하는 종목이다. 회전 경기가 기문을 통과하는 회전 기술을 겨루는 기술 계통의 경기라면, 활강 경기는 속도 계통의 경기라 할 수 있다. 활강 경기는 경기 중 최고속도가 160 km/h 에 육박하기 때문

에 가장 속도감 있는 경기이다. 2015년 까지 국내에는 활강이나 수퍼 대회전과 같은 속도계통의 경기를 진행할 수 있는 스키 슬로프가 없었으나, 2018년 평창올림픽을 대비하여 강원도 정선에 알파인 경기장을 완공하여 2016년 2월에 스키 월드컵 테스트 경기를 진행한 바 있다.

활강 경기에서는 선수의 몸에 가해지는 항력에 의한 감속을 최소화할 필요가 있다. 활강 중인 선수의 몸에 가해지는 항력은 스키와 설면 사이의 마찰 저항, 그리고 선수가 공기 중을 고속으로 이동함에 따라서 발생하는 공기 저항의 합으로 나타낼 수 있다.

본 연구는 선수의 활강 자세에 따른 공기저항(aerodynamic drag)과 설면을 누르는 힘(downforce)으로 분류 될 수 있는 공력(aerodynamic force)을 분석하여, 궁극적으로는 스키 선수의 최적의 활강 자세를 찾아내는 것을 목표로 하는 연구의 기초 연구라고 볼 수 있다. 본 논문에서는 스키 선수의 활강 자세를 촬영한 실사 이미지로부터 스키어의 형상 정보를 별도 연구자의 개입 없이 자동적으로 재구성하는 코드를 작성하였다. 재구성된 선수의 형상정보를 바탕으로 격자를 생성하였으며, 범용 CFD 소프트웨어인 Star-CCM+을 이용하여 스키 선수 주

Received: July 5, 2016, Revised: September 27, 2016,

Accepted: September 27, 2016.

* Corresponding author, E-mail: htahn@ulsan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2016.21.3.071>

© KSCFE 2016

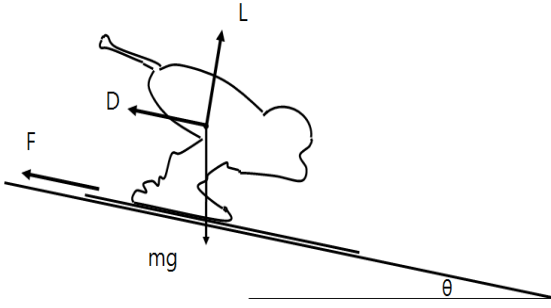


Fig. 1 The forces acting on a downhill skier

위의 공기유동을 모사하고 최종적으로 스키 선수에 작용하는 공기 저항과 양력에 해당하는 공력을 예측 하였다.

2. 수치 해석

2.1 스키 선수의 운동방정식

본 논문에서 고려하는 스키선수 주위의 CFD 해석은 정상 상태 해석, 즉 스키 선수는 일정한 경사도의 경사를 따라 종단속도(Terminal velocity)로 활강하고 있는 상태를 가정한다. 선수의 몸에 작용하는 힘은 Fig. 1과 같이 나타난다. 여기서 m 은 선수와 장비의 질량의 합이며, g 는 중력 가속도, θ 는 경사의 경사도, D 는 스키 선수의 운동 방향으로 작용하는 공기 역학적 항력, L 은 스키 선수의 운동 방향에 수직으로 작용하는 공기역학적 양력, F 는 스키와 눈 사이에 작용하는 마찰력이다. 선수의 몸에 작용하는 추진력은 운동방향에 대한 스키 선수의 무게이며, $mgsin\theta$ 로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 예측하고자 하는 유체에 의한 항력 D 와 양력 L 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A, \quad L = \frac{1}{2}\rho v^2 C_l A \quad (1)$$

C_d 와 C_l 은 각각 항력과 양력 계수이며, A 는 스키 진행방향에 대한 스키 선수의 투영 면적이다. ρ 는 공기의 밀도이며 v 는 활강 속도이다. 마찰력 F 는 스키의 형상, 왁스, 설면의 상태를 변수로 하는 설면 마찰계수 μ 를 포함하는 함수이다. 여기서는 마찰력을 식 (2)와 같이 정의하도록 한다.

$$F = \mu(mg\cos\theta - \frac{1}{2}\rho v^2 C_{lA}) \quad (2)$$

따라서 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{dv}{dt} = mgsin\theta - \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A - \mu(mg\cos\theta - \frac{1}{2}v^2 C_l A) \quad (3)$$

2.2 해석 모형 및 경계조건

본 연구에서는 상용 전산유동해석 소프트웨어인 Star-CCM+을 사용하였다. 계산에 사용된 공기 유동을 기술하는 지배방정식은 압축성 Navier-Stokes 방정식으로서 식 (4) continuity equation, 식 (5) momentum equation, 식 (6) energy equation으로 나타내어진다. 스키선수의 속도를 기반으로 상정한 Mach 수는 약 0.1정도로서, 일반적으로 공기의 압축성은 무시할 수 있는 영역으로 알려져 있으나, 본 논문에서는 향후 공기의 국부적인 압축성에 대한 효과도 분석하기 위한 계획을 염두에 두고 일반적인 압축성 유동으로 가정하여 해석을 진행하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j e_0 + u_j p + u_i \tau_{ij}] = 0 \quad (6)$$

여기서 p 는 압력, ρ 는 밀도, u_i 는 i 방향 속도 성분, τ_{ij} 는 전단응력 텐서, e_0 는 specific total energy를 나타낸다. 본 해석에 고려되는 공기유동의 Reynolds 수는 스키길이와 활강시의 종단속도를 기준으로 약 $Re \geq O(10^6)$ 이며, 이는 난류 유동영역에 들어간다. 본 연구에 사용된 난류 모델은 Realizable k- ϵ Reynolds-averaged Navier-Stokes 난류 모델을 사용하였다. k- ϵ 난류 모델은 수송방정식을 난류 운동 에너지 k 와 그 소산률 ϵ 에 대하여 계산하는 난류 모델로서, 상용적으로 널리 사용되고 있는 모델이다. Realizable k- ϵ 난류 모델은 기존의 k- ϵ 난류 모델에서 상수항으로 가정하고 있는 C_μ 항을 평균 유동과 난류 특성의 함수로 가정하여 기존의 모델에 비하여 정확한 해석이 가능하다. Realizable k- ϵ 난류 모델의 수송방정식은 식 (7), (8)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} \\ &= \int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \cdot d\mathbf{a} \\ &+ \int_V [f_c G_k + G_b - \rho((\epsilon - \epsilon_0) + Y_M) + S_k] dV \end{aligned} \quad (7)$$

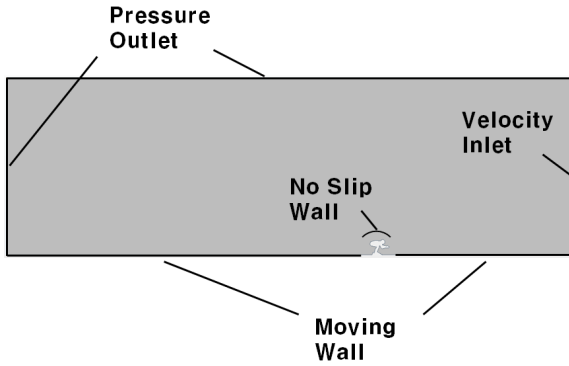


Fig. 2 Computational domain and boundary condition

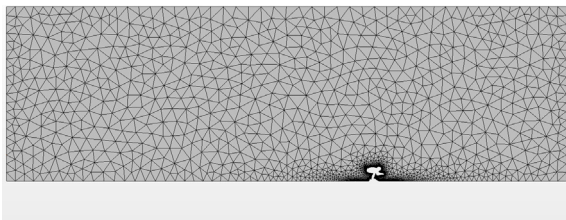


Fig. 3 Overall mesh

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{dt} \int_V \rho \epsilon dV + \int_A \rho \epsilon (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} \\
 & = \int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \cdot d\mathbf{a} \\
 & \quad + \int_V \left[f_c C_{\epsilon 1} S \epsilon + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} C_{\epsilon 3} G_b) \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\epsilon}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} C_{\epsilon 2} \rho (\epsilon - \epsilon_0) + S_{\epsilon} \right] dV
 \end{aligned} \tag{8}$$

스키 선수의 형상의 특성상, 유동의 박리점은 선수의 헬멧 부위로 고정되어 있음을 예측 할 수 있다. 따라서, 난류 모델의 영향은 박리점 이후의 후류 영역에서의 유동에 주로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 본 문제에서 난류 모델의 특성 비교는 논문의 범위를 넘어 서는 것으로 판단하고, 이는 향후 후속연구의 주제로 남겨 두고자 한다. 아울러, 본 유동과 같은 자유전단유동에서는 후류 영역의 격자 조밀도가 재부착 지점 예측의 정확도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료되며, 격자 크기에 따른 후류 영역 예측의 민감도에 대해서도 향후에 연구를 확장 하고자 한다.

3. 해 석

3.1 계산 조건

본 연구에서 사용한 CFD해석을 위한 영역은 Fig. 2, 3와

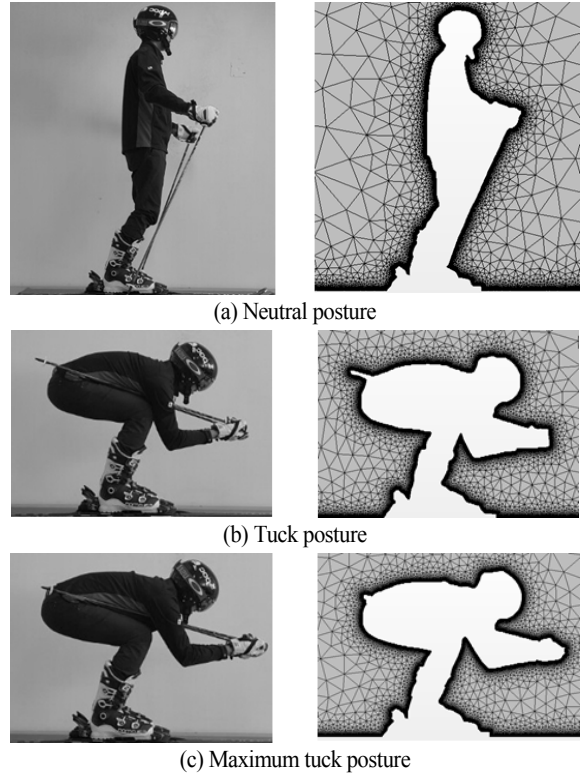


Fig. 4 Posture image and image-based 2D shape model

같다. 스키의 특성 길이를 L 이라 할 때, 몸체의 앞쪽에 $5L$, 뒤쪽에 $10L$ 의 영역을 설정하고, 위쪽으로는 $5L$ 의 영역을 설정하였다.

경계조건으로는 앞쪽으로부터 일정한 유속 v 를 가진 흐름이 유입되도록 설정하였으며, 위쪽과 뒤쪽 경계면은 대기압 대비 상대 압력 0 Pa 의 Pressure Outlet으로 설정하였다. 바닥면은 선수의 몸체를 제외한 바닥면을 유속과 동일하게 이동하는 Moving Wall로 설정하였으며 선수가 영하 5° 의 바람이 불지 않는 날씨에서 설면을 따라 활강하는 상황과 동일한 조건으로 조건을 설정하였다.

3.2 격자 생성

Fig. 4는 해석에 사용된 자세의 실사 이미지와 이를 바탕으로 구성된 형상 모델이다. 선수의 자세를 설면 위에 서있는 Neutral 자세, 공기 저항을 줄이기 위해 몸을 웅크린 Tuck 자세, Tuck 자세에서 팔을 앞으로 최대한 뻗은 Maximum Tuck 자세로 나누었으며, 각 자세에 대한 실사 이미지를 촬영하였다. 스키 선수의 형상정보 획득 과정에서, 인간 개입으로 인한 정보 왜곡을 최소화 하기 위하여, 실사 이미지를 바탕으로 이미지 프로세싱을 통하여 형상 정보를 획득하는 코드를 작

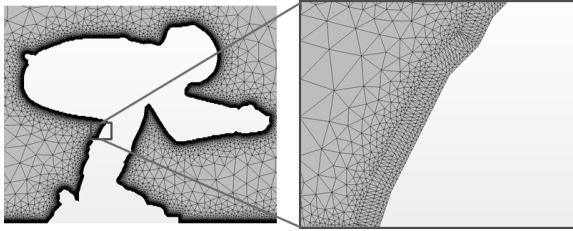


Fig. 5 Anisotropic meshing around a skier

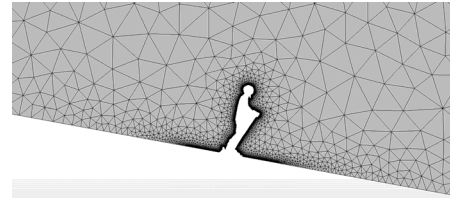
성하였으며 이를 통하여 이미지로부터 2차원 형상 모델을 구성하였다[7].

Fig. 5는 형상 모델 주위의 경계층에서 나타나는 유동의 속도 구배를 표현하기 위하여 형상 모델 근처에 이방성 (Anisotropic) 격자를 구성한 것이다. 벽면에 인접한 격자의 크기를 적절하게 구성하는 것은 정확한 점성유동 시뮬레이션 결과를 획득하는 데에 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서는 벽면 격자의 크기를 결정하기 위하여 평판 상의 경계층 이론을 적용하였다. 이번 해석에서는 Wall function을 적용하여 유동을 해석하였다. 이에 따라 벽면 격자의 무차원화된 벽간 거리(Dimensionless Wall Distance) y^+ 가 $y^+ < 300$ 을 만족할 수 있도록 격자의 크기를 $\Delta s = 0.00109$ m로 결정하였으며, Anisotropic Tetrahedral Extrusion 메쉬 생성 기법을 통해 형상 모델 벽면 근처에 적용하여 4개의 층으로 이루어진 이방성 격자를 구성하였다. 해석 결과, 모든 케이스에 대한 y^+ 의 최대값이 190.2인 것을 확인하였다.

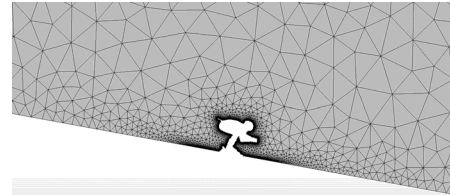
4. 결 과

4.1 해석 결과

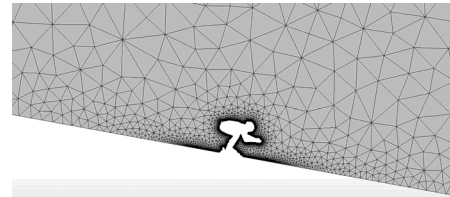
$v = 30$ m/s에서 각 자세에 따른 메쉬, 유속, 압력, 유선은 Fig. 6-9과 같이 나타내어진다. Fig. 6에서는 (b)와 (c)를 비교하면, Tuck 자세와 Maximum Tuck 자세의 차이를 확인 할 수 있다. Tuck 자세에 비하여 Maximum Tuck 자세의 경우, 선수의 손의 위치가 더욱 전방으로 이동하였으며, 이로 인하여 스키 폴(ski pole)의 끝단 돌출부가 더욱 선수 몸체로 부착되었음을 확인 할 수 있다. Fig. 7에서는 압력 등고선을 나타내었다. 그림에서 확인 할 수 있는 바와 같이, 압력 등고선으로 판별되는 최저 압력 영역이 (a) Neutral, (b) Tuck, (c) Maximum tuck 으로 갈수록 축소되는 경향을 확인 할 수 있다. 실제로, 이는 전체 압력저항의 감소로 이어지는 것을 예상 할 수 있다. Fig. 8에서는 속도 분포를 나타내었다. Neutral 자세에 비해 Tuck 자세에서 선수 뒤의 Wake 영역이 크게 감소한 것으로 나타났으며, Maximum Tuck 자세에서 가장 작은 Wake 영역이 나타났다. Fig. 8에 보여진 속도 분포를 이용하



(a) Regional close up in neutral posture at $v = 30$ m/s

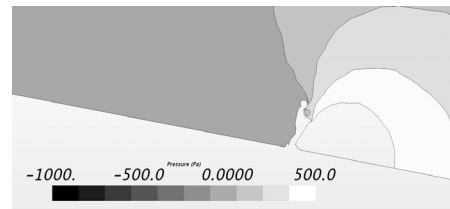


(b) Regional close up in tuck posture at $v = 30$ m/s

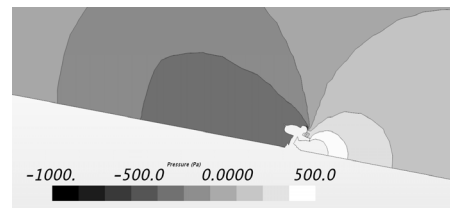


(c) Regional close up in maximum tuck posture at $v = 30$ m/s

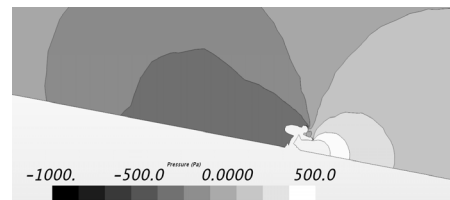
Fig. 6 Regional close up in various racing positions



(a) Pressure in neutral posture at $v = 30$ m/s

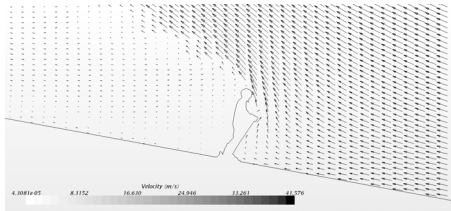


(b) Pressure in tuck posture at $v = 30$ m/s

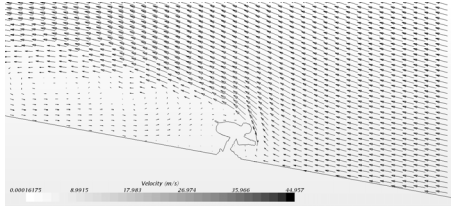


(c) Pressure in maximum tuck posture at $v = 30$ m/s

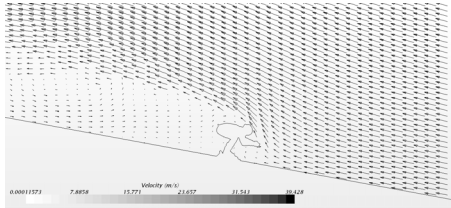
Fig. 7 Pressure in various racing positions



(a) Velocity distribution in neutral posture at v = 30 m/s



(b) Velocity distribution in tuck posture at v = 30 m/s



(c) Velocity distribution in maximum tuck posture at v = 30 m/s

Fig. 8 Velocity distribution in various racing positions

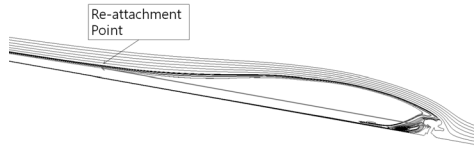
여, 스키선수 주위의 유선 분포를 Fig 9에 나타내었다. Fig 9에 보여진 유선 분포를 이용하여, 스키 선수의 머리 부분에서 박리된 유동이 스키 선수 후방에서 재 부착(Re-attachment) 되는 지점을 측정해 보았다. 다소 정성적 결과이기는 함에도 불구하고, Fig 8(a)-(c) 결과를 비교할 때에, Maximum Tuck 자세가 상대적으로 스키선수 가장 가까운 지점에서 유동의 재부착이 발생함을 확인할 수 있다. 선수 몸 주변의 유선을 분석한 결과, 선수의 몸에 의해 지면으로부터 박리된 유동이 다시 지면과 만나는 Reattachment Point와 선수의 몸체 사이의 거리가 Neutral 자세에서 가장 길었으며, Tuck 자세를 취했을 때 급격히 줄어들어 Maximum Tuck 자세에서 최소가 되는 것을 확인하였다. 이는 Reattachment Point와의 거리가 감소한 것은 선수의 후방으로 발생하는 Recirculation 영역의 크기가 감소

Table 1 Drag of a skier in various racing positions and wind speeds

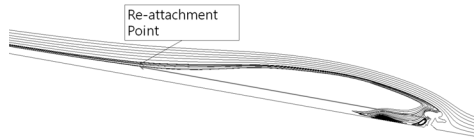
Drag (N/m)	30 m/s	45 m/s	60 m/s
Neutral	1065.2	2394.8	4255.5
Tuck	584.1	1320.5	2329.6
% Difference from neutral position	45.2%	44.9%	45.3%
Maximum tuck	549.1	1238.2	2192.9
% Difference from neutral position	48.5%	48.3%	48.5%



(a) Streamlines in neutral posture at v = 30 m/s



(b) Streamlines in tuck posture at v = 30 m/s



(c) Streamlines in maximum tuck posture at v = 30 m/s

Fig. 9 Streamlines in various racing positions

한 것을 의미한다. 따라서 이것은 선수의 전방과 후방의 압력 차가 감소하여 선수의 몸에 작용하는 Drag가 감소한 것과 관련된 해석으로 판단된다.

이러한 정성적인 상대 비교는 다음 표에서 정량적으로 재 확인 된다. 풍속과 자세에 따른 Drag와 Lift는 각각 Table 1, 2와 같이 나타내어진다. Neutral 자세에 비해 Tuck 자세에서 50% 가량의 Drag의 감소를 확인할 수 있었으며, Maximum Tuck 자세에서는 근소한 차이이지만, 가장 작은 Drag가 나타났다. 또한, 설면과의 수직인 양력 변화에서도 놀라운 차이가 관측되었다. Neutral 자세에서는 유동에 의한 Lift가 아래로 작용하는데, 이는 수직 항력을 증가시켜 결과적으로 마찰력이 증가하게 된다. 반면 Tuck 자세와 Maximum Tuck 자세에서는 Lift가 위로 작용하여 설면의 수직 반력이 감소하기 때문에 오히려 마찰력이 감소하는 효과를 가지게 된다.

4.2 종단 속도 예측

스키 선수는 활강하면서 중력에 의하여 운동방향으로 가속

Table 2 Lift of a skier in various racing positions and wind speeds

Lift (N/m)	30 m/s	45 m/s	60 m/s
Neutral	-470.9	-1085.0	-1949.8
Tuck	213.2	464.3	713.2
% Difference from neutral position	145.3%	142.8%	136.6%
Maximum tuck	244.8	536.7	896.3
% Difference from neutral position	152.0%	149.5%	146.0%

하여 활강 속도가 증가한다. 이 때 속도가 증가함에 따라 공기역학적 Drag가 증가하므로, 일정 속도에서 선수에 몸에 가해지는 힘의 합이 0이 되어 일정한 활강속도로 운동하게 된다. 이 때의 속도를 종단 속도라고 하며, 해석 결과를 바탕으로 식 (3)을 이용하여 선수의 종단 속도를 예측하였다.

경사도 θ 는 정선 활강 경기장의 경사와 같은 17°, 선수의 질량 m 은 100 kg, 스키와 설면 사이의 마찰계수 μ 는 0.05로 가정하였으며 선수의 몸에 작용하는 Drag와 Lift는 유동 방향에 대하여 스키선수의 몸의 주형계수(Prismatic Coefficient)를 0.8로 가정하여 이를 곱해 적용하였으며, 각 풍속에 대한 결과를 내삽(Interpolation)하여 Table 3와 같은 결과를 얻었다.

Table 3에서 보이는 바는, 2차원 정상상태 CFD해석 결과 바탕으로 상정한 종단속도 입에도 불구하고, 실제 활강 경기에서 관측되는 스키선수의 속도와 상당히 일치하는 결과임을 확인 할 수 있다[1,2,3].

5. 결 론

본 연구에서는 알파인 스키 활강 경기에서 선수의 몸에 작용하는 Drag와 Lift를 분석하기 위하여 2차원 전산공력해석을 수행하였다. 스키 선수의 활강 자세를 촬영한 실사 이미지로부터 스키어의 형상 정보를 자동적으로 재구성하는 코드를 작성하여 재구성된 선수의 형상정보를 바탕으로 격자를 생성하였으며, 선수의 자세에 따른 영향을 해석하기 위하여 선수가 설면 위에 서있는 Neutral 자세, 공기 저항을 줄이기 위해 몸을 웅크린 Tuck 자세, Tuck 자세에서 팔을 앞으로 최대한 뻗은 Maximum Tuck 자세로 나누어 해석을 수행하였다.

Drag의 경우 활강 자세를 취했을 경우에 약 50% 감소하는 것으로 나타났으며, 활강자세에서 팔을 앞으로 최대한 뻗을수록 선수의 뒤로 발생하는 Wake 영역을 감소시켜 적은 Drag가 발생하는 것으로 나타났다. Lift의 경우 Neutral 자세에서는 아래로 작용하여 설면과 스키 사이의 마찰력을 증가시키는 반면, 활강 자세에서는 위로 작용하여 마찰력을 감소시키는 것을 확인하였다. 이를 통해 활강 자세는 Neutral 자세에 비하여 공기역학적으로 Drag와 Lift 측면에서 모두 유리하게 작용하는 것을 확인하였다.

Table 3 Terminal velocity of a skier in various racing positions

	Neutral	Tuck	Maximum tuck
Terminal velocity(m/s)	22.3	30.7	31.8
Terminal velocity(km/h)	80.2	110.5	114.3
Terminal Velocity Increment Relative to Neutral Position Case(%)	-	37.9	42.6

본 연구는 선수의 활강 자세에 따른 공기저항과 공력을 분석하여 최적의 활강 자세를 결정하기 위한 선행연구로서 진행되었다. 해석 결과, 공기역학적 Drag와 Lift를 분석함으로써 활강 단계에서 스키 선수가 취하는 활강 자세에 대한 이론적인 배경을 검증하였으며, Drag가 가장 작은 효율적인 활강 자세를 결정하였다. 본 연구에서는 2차원으로 유동을 해석하였기 때문에 이를 바탕으로 예측한 공기 유동과 실제 알파인 스키 활강 선수의 몸에 작용하는 공기 유동에는 차이가 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구를 통하여 파악한 유동 및 Drag와 Lift의 경향성을 바탕으로, 추후에 더 합리적이고 실제 스키 선수 주변의 유동을 더 잘 반영하는 3차원 CFD 분석을 진행하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(과제번호 : 2013-007924)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] 1987, Simon, M. and Jachen, D., "The Influence of Aerodynamic and Anthropometric Factors on Speed in Skiing," *Journal of biomechanical engineering*, Vol.3-4, pp.345-352.
- [2] 2010, Len, B., Guy, L., Annick, D., Todd, A., Frank, M., Paul, K., Serge, D., Robert, B. and Dale, S., "Factors affecting the aerodynamic drag of alpine skiers," *Procedia engineering*, Vol.2, pp.2375-2380.
- [3] 2001, Thompson, B.E., Friess, W.A. and Knapp, K.N., "Aerodynamics of speed skiers," *Sports Engineering*, Vol.4-2, pp.103-112.
- [4] 2011, Chen, Z. and Fang, H., "The Effects of Wind and Posture on the Aerodynamic Performance During the Flight Stage of Skiing," *Journal of biomechanical engineering*, Vol.133, pp.1-5.
- [5] 2015, Lee, Y.N. and Kim, K.Y., "Aerodynamic Study on Bobsleigh Bumper Shape," *Journal of computational fluids engineering*, Vol.20, No.2, pp.37-45.
- [6] 2012, Son, K., Ryu, M. and Cho, J., "Aerodynamic Analysis on Ski Jump Flying Postures," *Journal of the Korean society for aeronautical and space sciences*, Vol.40, No.3, pp.193-200.
- [7] 1992, Woods, C., "Digital image processing," *Addison-Wesley*, Reading, ss.