

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.3.193>

스키점프 비행 자세에 따른 공력 해석

손갑식*, 류민형*, 조진수**

Aerodynamic Analysis on Ski Jump Flying Postures

Kapsik Son*, Minhyoung Ryu* and Jinsoo Cho**

ABSTRACT

A numerical analysis is carried out in order to obtain aerodynamic data of the ski jump. The body modelling of Korean people is used in the numerical simulation and the result is validated by comparing it with the wind tunnel experiment. A flying posture, which provides the maximum lift-to-drag ratio, is found by analyzing the aerodynamic coefficients of various flight conditions. The result of the present study can be applied to fixing the postures of Korean ski players and is expected to advance the national sports science.

초 록

스키점프 공력 특성에 관한 자료 획득을 목적으로 전산 수치 해석을 수행하였다. 한국인의 체형을 고려한 인체 모델링 기법을 적용하였으며 해석 결과의 검증을 위해 기존 풍동 실험 연구 결과를 비교 분석하였다. 다양한 비행 조건에서 공력 계수를 분석하여 최대 양항비를 나타내는 비행 자세를 발견하였다. 본 연구가 대한민국 스키점프 선수들의 비행 자세 교정과 국내 스포츠 과학 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

Key Words : Ski Jumping(스키점프), V-Style(V-스타일), Flying Posture(비행 자세), Human Body Modeling(인체 모델링), Lift-to-Drag Ratio(양항비)

1. 서 론

스키점프(ski jumping)는 스키 선수들이 스키 점프대의 급경사면을 타고 내려오다 도약대에서 허공을 날아 착지하는 스포츠로 눈 위에서 펼쳐지는 주된 겨울 스포츠이다. 1924년 제1회 동계 올림픽 대회부터 정식 종목으로 채택되었으며 인공 환경이 제공된다면 여름에도 즐길 수 있다[1]. 스키점프 관련 연구는 유럽, 일본 등 동계스포츠

선진국에서 주로 진행되어 왔으며 이미 스위스, 오스트리아 등지에서는 연구 결과를 바탕으로 동계올림픽에서 메달을 획득하고 있다. 대한민국도 2018년 평창 동계올림픽 개최가 확정됨에 따라 스키점프 종목에 대한 국민적 관심과 더불어 체계적인 연구가 요구되는 시점에 이르렀다. 1927년 Straumann[2]의 풍동 실험을 시작으로 지속되어 온 스키점프 연구는 최근 스포츠 과학 발전에 힘입어 많은 성과를 이루었다. Meile[3]는 스키점프 비행에서의 공력 특성을 풍동 실험을 통해 분석하고 경기 복장에 따른 공기역학적 연구를 수행하였으며 Seo[4]는 다리를 V자로 벌린 자세가 평행하게 모으는 자세보다 뛰어난 공력 특성을 가짐을 입증하였다. Schmölder[5]는 2002년 솔트레이크 동계올림픽에 참가한 스키점프 선

† 2011년 9월 23일 접수 ~ 2012년 1월 26일 심사완료

* 정회원, 한양대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

교신저자, E-mail : jscho@hanyang.ac.kr

서울특별시 성동구 행당동 17

수들의 경기 중 움직임을 측정하여 공력 실험 및 해석에 필요한 데이터를 체계적으로 정리한 바 있다. 그러나 풍동 실험을 통한 기존 연구들의 경우, 모델 지지대 등에서 발생하는 실험 오차가 수반되며 실험 표본수와 파라미터의 범위가 협소하여 포괄적인 결론을 도출하는 데 한계가 있다.

본 연구의 목적은 대한민국 국가대표 스키점프 선수들의 경기 기록 향상과 스키점프 공력 특성에 관한 기초 자료 획득을 위해 한국인의 체형 특성이 고려된, 보다 공력 성능이 우수한 스키점프 비행 자세를 찾아내는 데 있다. 이에 따라 국가대표 선수들의 장비 규격 및 비행 자세를 분석하고 대한민국 표준 남성의 체형을 적용하여 연구를 수행하고자 한다. 또한, 비행 자세를 결정하는 해석 파라미터를 가능한 넓은 범위에 걸쳐 변화시키며 공력 해석을 수행하여 경기 기록 향상이 기대되는 비행 자세를 발견하고자 한다.

II. 연구 이론 및 방법

2.1 수치 해석

스키점프 선수 주위의 외부 유동 해석을 위해 ANSYS社의 CFX Ver. 13을 사용하여 RANS 방정식을 계산하였으며, Menter의 $k-\omega$ 기반 SST 난류 모델[6]을 이용하여 난류 유동을 예측하였다. 상기 난류 모델은 압력의 역구배에 의한 벽 근처 유동 박리 현상과 전단 응력을 예측하는데 있어 비교적 정확한 결과를 보여주는 것으로 알려져 있으며[7][8], 별도의 추진 동력이 없는 스키점프 종목의 특성 상 정밀한 항력 예측이 요구되어 해석에 적합한 난류 모델로 선정하였다.

2.2 해석 모델

스키점프 선수 모델의 형상 및 비행 자세 제어 변수를 Fig. 1에 나타내었다. 해석 파라미터로 받음각(α), 발목각(β), 허리각(γ), 스키각(V), 팔각(θ)을 선정하였으며 받음각은 참고문헌[3][5]에서와 마찬가지로 활공 시 지면을 기준으로 삼아 측정하였다. 해석 모델은 국가대표 선수들의 평균 신장과 장비 규격을 사용하여 Reisenberger의 인체 모델링 기법[9]을 바탕으로 원과 각기둥 형상

Table 1. Dimensions of National Team Athletes and Equipments

| Height of Body | Ski Length | Mounting of Bindings | Ski Width |
|----------------|------------|----------------------|-----------|
| 1,700mm | 2,550mm | 1,410mm | 115mm |

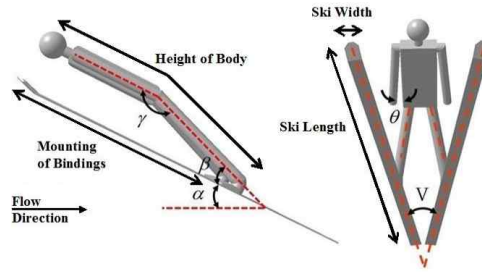


Fig. 1. Model Geometry and CFD Parameters

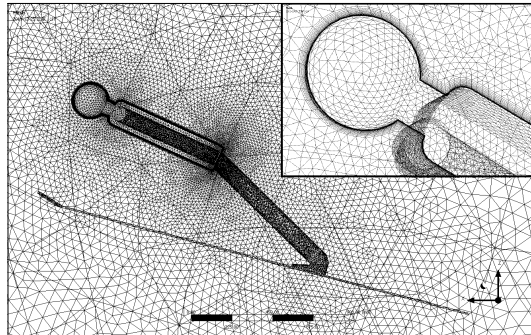


Fig. 2. Hybrid Mesh and Inflation Grids on Boundary Layer(Mesh Quality=3.5M)

에 기반하여 설계하였다. 해석 파라미터를 정확한 수치로 조작 가능하도록 3차원 어셈블리 모델을 제작하였으며 인체 비례는 한국 남성의 표준 체형[10]을 적용하였다.

2.3 해석 격자

Figure 2에 모델 주위 격자 형상을 나타내었다. 격자의 전체 요소 개수는 약 350만 개, 노드 수는 약 100만 개이며 경계층 해석을 위해 모델 표면에 첫째 레이어 두께를 무차원 벽면거리 $y^+ = 1$ 로 하여 확장비 1.2의 프리즘 레이어를 30겹으로 생성하였다. 일반 유동 영역은 최소 격자 크기 약 1mm로 시작하여 일정비(1.05)로 확장되는 형태를 취하였으며 격자의 최대 크기는 500mm로 제한하였다.

2.4 해석 조건

전체 해석 영역은 풍동과 유사한 직육면체 형상으로, 벽면의 간섭 효과를 최소화하기 위해 모델의 각 축방향 최대 길이의 10배 크기로 영역을 설정하였다. 유입구 조건은 국가대표 선수들의 최종 활강 속도인 90km/h의 풍속을 5% 난류 강도로 기입하였고, 대기는 0°C의 공기 물성치를

사용하였다. 모델 표면에는 no-slip, 외부 영역 계면에는 flow-tangency 경계조건을 설정하였다. 무차원 벽면거리($y+$) 산정을 위한 레이놀즈 수는 $Re = 4.59 \times 10^6$, 특성 길이로는 스키 길이를 사용하였으며 연속 방정식의 RMS 오차를 10^{-4} 이하로 수렴시켰다. 측풍 효과는 무시하였으며 후류(wake)의 영향을 반영하기 위해 모델을 유입 구로부터 40% 위치에 고정시킨 후, 좌우 대칭성을 고려하여 symmetry 해석을 수행하였다.

2.5 공력 특성

스키점프 비행 시 작용하는 공기역학적 특성은 양력계수(C_L , lift coefficient), 항력계수(C_D , drag coefficient), 양항비($\frac{L}{D}$, lift-to-drag ratio), 피칭 모멘트 계수(C_M , pitching moment coefficient)로 나타내었으며 각 무차원 변수는 다음과 같이 정의된다.

양력 계수(lift coefficient): $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_P}$ (1)

항력 계수(drag coefficient): $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_P}$ (2)

양항비(lift-to-drag ratio): $\frac{L}{D} = \frac{\frac{1}{2}\rho v^2 A_P C_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_P C_D}$ (3)

피칭 모멘트 계수(pitching moment coefficient):

$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_P l}$ (4)

여기서, 기준 면적 A_P 는 planform area, l 은 특성 길이를 의미한다. 양항비는 공기역학에서 쓰이는 주요 비행성능지표 중 하나로서 이 값이 높을수록 스키점프 선수는 더 멀리 더 오랜 시간 비행이 가능하다. 피칭 모멘트 계수를 분석하여 비행 중인 선수의 정적 세로 안정성을 평가하였다.

III. 해석 결과

3.1 격자 수렴 특성

경계층 묘사를 위한 inflation 격자계의 경우, FLT(first layer thickness) 값이 작아질수록 속도 구배가 가파른 표면 인접 노드에서의 해석 정확도

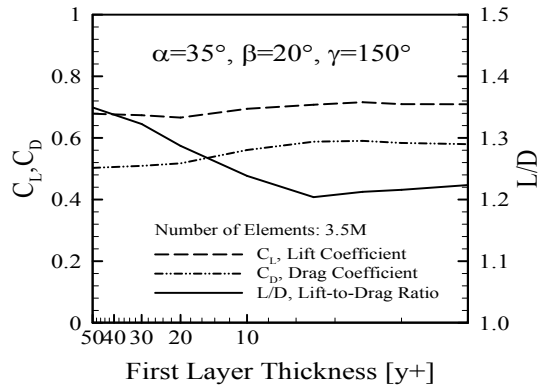


Fig. 3. FLT Validation(Number of Grids=3.5M)

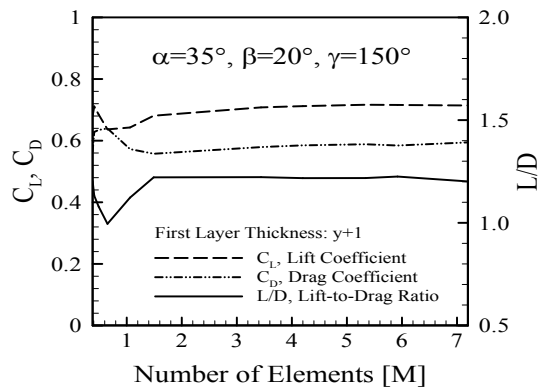


Fig. 4. Grid Number Validation(FLT: $y+=1$)

가 향상된다.

Figure 3은 FLT 수치에 따른 격자 수렴 해석을 수행한 결과이다. 국가대표 선수들의 평균 비행 자세를 기준으로 전체 격자수를 약 350만개로 통일하였으며 prism 격자층의 두께는 식 (5)의 Blasius 난류 경계층 두께식을 사용하였다.

$\delta_{turb} = \frac{0.382x}{(Re_x)^{1/5}}$ (5)

그래프에 따르면 FLT가 $y+=1$ 에 접근할수록 양항비가 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 $u+$ 와 $y+$ 값이 정비례하는 $y+=5$ 이하의 viscous sublayer 구간에서는 양항력 및 양항비가 1% 미만의 수치 변화를 보여 격자 수렴성 측면에서 우수한 해석 결과를 나타내었다.

Figure 4는 전체 격자수 변화에 따른 해석 결과로서 150~720만개의 구간에서 2% 이내의 양항비 오차를 나타내어 수치 해석 결과가 약 150만개 이상의 격자수에서 안정됨을 확인하였다.

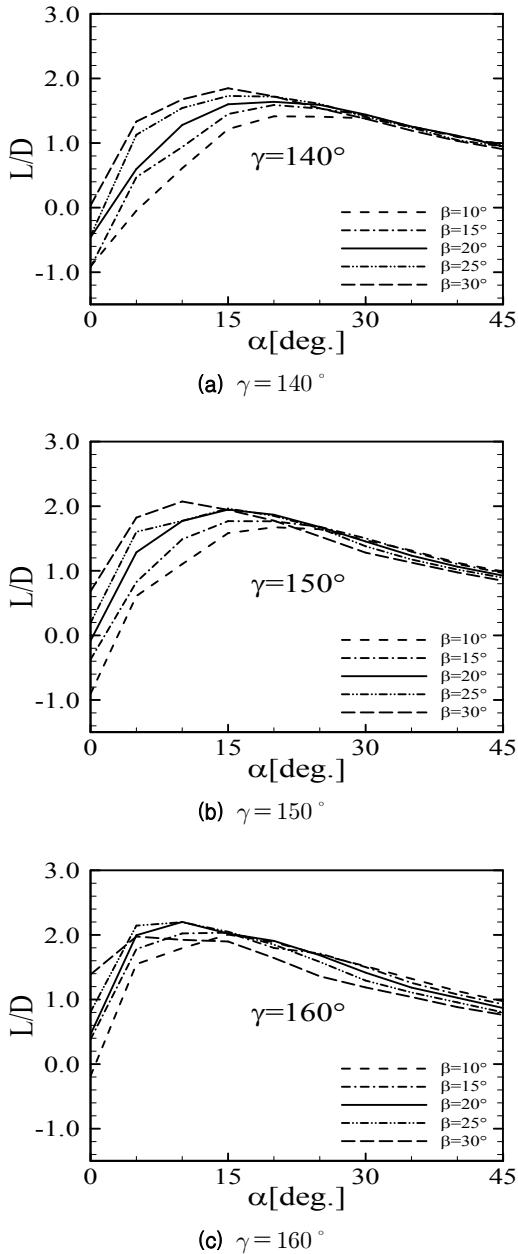


Fig. 5. Lift-to-Drag Ratio (α, β, γ)

Table 2. Range of CFD Parameters (α, β, γ)

| Parameter | $\alpha [^\circ]$ | $\beta [^\circ]$ | $\gamma [^\circ]$ |
|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Average in Europe | 35 | 20 | 140 |
| Average in Korea | 35 | 20 | 150 |
| Range | 0~45 | 10~30 | 140~160 |
| Increment | 5 | 5 | 10 |

3.2 α, β, γ 변화에 따른 해석 결과

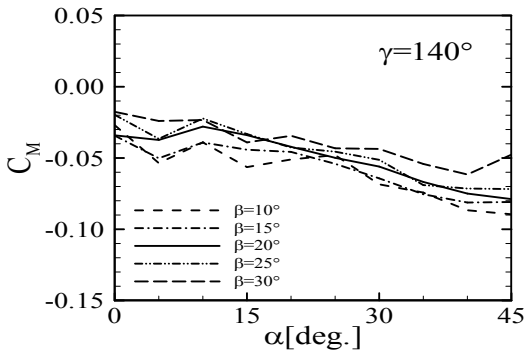
활공 거리에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 받음각(α), 발목각(β), 허리각(γ) 조합에 따른 공력 특성을 분석하였다. Schmörlzer[5]가 분석한 2002년 동계올림픽 참가 선수들의 비행 자세와 대한민국 국가대표 선수들(강철구, 최용철, 김현기, 최용직)의 협조 하에 측정된 비행 자세를 바탕으로 α, β, γ 파라미터의 해석 범위를 결정하여 Table 2에 표기하였다. 스키각(V)은 상기 선수들의 평균치인 30° , 팔각(δ)은 동계올림픽 참가 선수들의 평균치인 5.3° 로 고정한 후, α 와 β 에 대해서는 5° 간격, γ 에 대해서는 10° 간격으로 조합한 비행 자세에 대하여 정상 유동 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 공력 계수 산출을 위한 수식 (1)~(4)의 A_p 와 l 의 값으로 한국 평균 비행 자세(Table 2)의 planform area와 스키 길이(Table 1)를 사용하였다.

Figure 5(a)~(c)에 스키점프 선수 모델의 비행 자세에 따른 양항비를 나타내었다. 해석 결과, $\alpha = 10^\circ, \beta = 20^\circ, \gamma = 160^\circ$ 의 자세에서 최대 양항비 2.201이 도출되었으며 이어서 $\alpha = 10^\circ, \beta = 25^\circ, \gamma = 160^\circ$ 에서 2.197, $\alpha = 5^\circ, \beta = 25^\circ, \gamma = 160^\circ$ 에서 2.144, $\alpha = 10^\circ, \beta = 30^\circ, \gamma = 150^\circ$ 에서 2.073 순으로 양항비가 높게 나타났다. $\gamma = 140^\circ$ 의 경우 $\alpha = 15^\circ, \beta = 30^\circ$ 인 자세가 양항비 상위 20위 이하를 기록하여 $\gamma = 140^\circ$ 보다는 $\gamma = 150 \sim 160^\circ$ 의 자세에서 더 높은 양항비가 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에 따르면, 스키점프 활공 시 최대 양항비를 결정짓는 지배적 요인은 허리각(γ)으로 추정되며, γ 각이 10° 증가할 때마다 α 각이 약 5° 감소하는 지점에서 양항비를 가능한 높게 유지할 수 있는 것으로 분석되었다. 즉, 양항비의 극대점은 식 (6)과 같은 관계식을 따르는 것으로 파악된다.

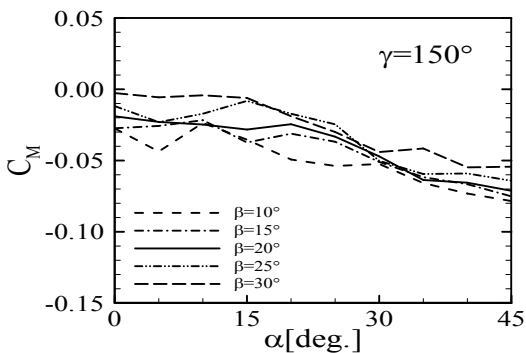
$$\Delta\alpha - \Delta\frac{\gamma}{2} = 0, \beta = 25 \pm 5^\circ \quad (6)$$

Figure 6에 스키점프 선수에 작용하는 피칭 모멘트 계수를 비행 자세별 무게중심에서 기록하였다. 에어포일이나 평판과는 달리 스키점프 선수 유동에서는 바인딩 및 부츠 근방에서 발생하는 1차 난류가 스키 후방에 유도 항력으로 영향을 미치게 되므로 발목각(β) 변화에 따라 모멘트 편차가 상당히 크게 예측되었다. 해석 결과에 따르면, 받음각에 따른 피칭 모멘트 변화율($dC_M/d\alpha$)은 $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ, \alpha \geq 40^\circ$ 구간에서 +/-를 오가며 교호 응답(alternative response)에 의한 세로 불안

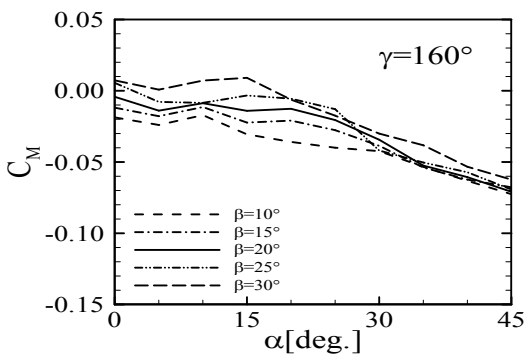
정성을 나타내었으나 C_M 값은 대부분의 자세에서 음의 값을 지니며 복원 모멘트가 발생하였다. 스키점프는 무동력 활공 종목으로 $\gamma=140\sim 150^\circ$ 의 자세보다는 모멘트 평형($C_M=0$) 근방인 $\gamma=160^\circ$, $\alpha \approx 0\sim 15^\circ$ 의 자세에서 안정된 비행이 가능하다. Fig. 5, 6에 의하면 $\alpha \approx 10^\circ$, $\beta=25 \pm 10^\circ$, $\gamma=160^\circ$ 의 자세에서 양항비가 가장 높고 모멘트의 크기가 최소화되어 경기 기록 향상이 기대된다.



(a) $\gamma = 140^\circ$

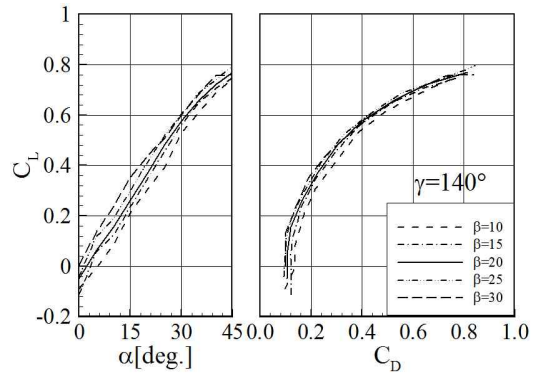


(b) $\gamma = 150^\circ$

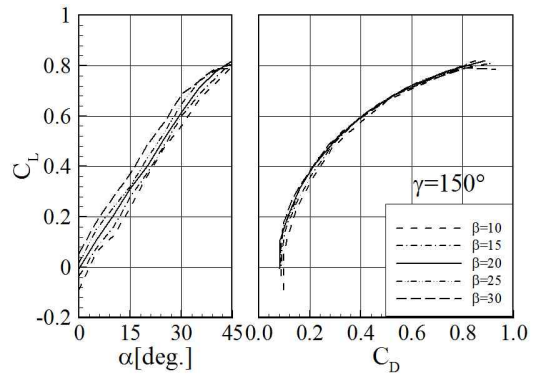


(c) $\gamma = 160^\circ$

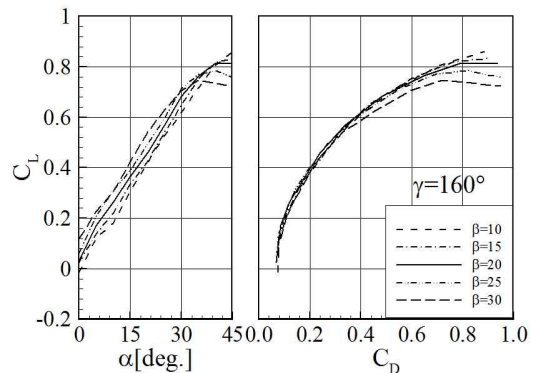
Fig. 6. Pitching Moment Coefficient(α , β , γ)



(a) $\gamma = 140^\circ$



(b) $\gamma = 150^\circ$



(c) $\gamma = 160^\circ$

Fig. 7. Aerodynamic Coefficients (α , β , γ)

Figure 7에서 양항력계수 곡선을 나타내었다. 그래프에 따르면, $\alpha \approx 30^\circ$ 까지는 받음각이 상승함에 따라 양력계수가 선형적으로 증가하였으나 $\alpha \approx 35^\circ$ 에 이르면 양력계수의 정체 내지 하강 현상이 예측되어 실속받음각(α_{stall})으로 추정되었다. 비행 중인 스키점프 선수의 영(零)양력 저항 계수(zero-lift drag coefficient)는 약 0.1을 기록하였으며 각 곡선들은 $C_D < 0.8$ 구간에서 유사한

형상을 나타내었으나 γ 각이 커질수록 $C_D \geq 0.8$ 구간에서 양력 대비 항력계수가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이는 허리각이 커질수록 선수의 자세가 평판에 가까워지게 되어 상체부에서 발생하는 항력이 증가하기 때문이다.

Figure 8은 α, β, γ 에 따른 양항비를 Meile[3]의 풍동 실험 결과와 비교한 그래프로 두 결과 사이에는 평균 0.25의 양항비차가 나타났다. 이는 풍동 실험과 해석 조건의 차이(Table 3)로 발생한 것이다. Meile의 풍동 실험에서는 지지대와 자세 제어용 장치가 부착된 축소 모형이 사용되었고 모델의 측정 비행 자세에 따라 10% 이상의 폐색률(blockage ratio)을 기록하여 폐색 효과(blockage effect)가 발생하였다. 반면, 본 연구에서는 대한민국 국가대표 선수의 실측 치수와 실제 비행 조건을 바탕으로 해석을 수행하였으며 테스트 영역의 벽면 효과를 제거하고 단면적을 충분히 확장하여 폐색 효과를 최소화하였다. 폐색률이 최대 0.4% 미만으로 감소하고 지지대와 부착 장치에 의한 교란이 사라짐에 따라 풍동 실험에 비해 항력이 감소하고 양항비가 상승한 결과가 예측되었다. 그러나 Fig. 8에서 무엇보다 주목해야 할 비교 대상은 비행 자세에 따라 변화하는 상대적인 공력 성능으로, $\gamma=160^\circ$ 의 자세에서 α, β 증가에 따른 양항비 감소 경향이 CFD 해석과 실험 결과에서 서로 유사한 것으로 확인됨에 따라, 본 연구에 적용된 한국형 인체 모델링 해석 기법이 스키점프 공력 특성 분석에 있어 타당한 성능을 나타내는 것으로 사료되었다.

Table 3. Setup Environment of CFD Analysis and Wind Tunnel Test

| Setup Condition | Present | Meile[3] |
|-----------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Model Size | Real Size (1.70m) | Downscaled (1.78m × 1/√2) |
| Model Geometry | Ideal Prismatic Body | Posture Control bar Attached |
| Reynolds Number | 4.59 × 10 ⁶ | 5.62 × 10 ⁶ |
| Wall-Boundary Condition of Test Section | Flow Tangency B.C. | Non-Slip B.C. |
| Existence of Strut | None | Upper and Lower Struts |
| Blockage Ratio | 0.069~0.376% | 6~14% |

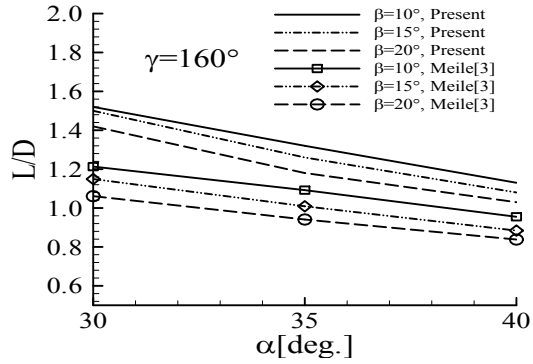


Fig. 8. Wind Tunnel Test Results (Meile[3])

3.3 V, θ 변화에 따른 해석 결과

스키점프 경기 기록에 영향을 미치는 비행 자세 파라미터로 스키각(V)과 팔각(θ)이 존재한다. 국가대표 선수들의 비행 자세(Table 2)를 참조하여 결정한 해석 파라미터의 범위와 간격을 Table 4에 나타내었다.

Figure 9, 10에 스키각(V) 및 팔각(θ)에 따른 양항비 변화를 기록하였다. 상기 파라미터에 의한 비행 자세 변화에서는 모델의 형상 및 주위 유동은 전체 표면적을 그대로 유지한 채 중방향보다는 횡방향의 성분 변화를 유도하므로 α, β, γ 각에 의한 자세 변화에 비해 양항비 차이가 적을 것을 예상 가능하다. 이에 따라 $\alpha=25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 의 3가지 받음각 자세로 표본을 증가시켜 통계적 분석을 시도하였다. 해석 결과, 전반적으로 V각은 커지고 θ 각은 작아질수록 양항비가 증가하는 경향을 보였으나 양항비의 증감 구배는 받음각별로 상이한 결과를 나타내었다. $\alpha=25^\circ, 30^\circ$ 의 경우, V각 변화에 따라 약 10%, θ 각에 의해서는 약 15%의 양항비차가 예측되었으며 $\alpha=35^\circ$ 에서는 각각 약 5%, 8% 수준의 양항비차를 기록하였다. 공통적으로 $V=0^\circ, \theta=40^\circ$ 에서 최소 양항비를 나타내었으며 최대 양항비는 받음각별로 $V \approx 30 \sim 40^\circ, \theta \approx 0 \sim 10^\circ$ 의 자세에서 발생하여 해당 자세에서 경기 기록 향상이 이루어질 가능성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 각 파라미터의 구간에 따라 그래프의 1, 2차 도함수 및 부호가 서로 다르기 때문에 단조 증가 혹은 감소성 예측은 곤란하며, 오히려 받음각으로 구별된 각 곡선간의 평균 양항비차가 0.19를 상회하는 것으로 나타나 스키점프 비행에서 스키각(V)이나 팔각(θ)보다는 받음각(α)이 지배적인 비행 성능 변수로 작용한다는 사실을 알 수 있다.

Table 4. Range of CFD Parameters (V , θ)

| Parameter | V [°] | θ [°] |
|-----------|---------|--------------|
| Range | 0~40 | 0~40 |
| Increment | 10 | 10 |

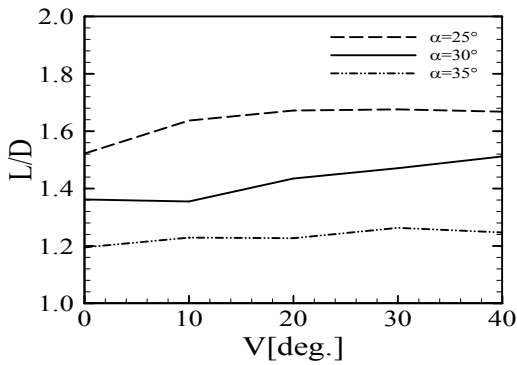


Fig. 9. Lift-to-Drag Ratio (V)

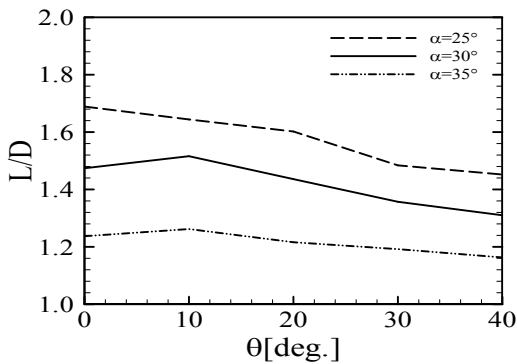


Fig. 10. Lift-to-Drag Ratio (θ)

Table 5. Wind Tunnel Test Results (Seo[4])

| V [°] | 0 | 10 | 25 |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| L/D(Present) | 1.195 | 1.229 | 1.232 |
| L/D(Seo[4]) | 1.112 | 1.129 | 1.260 |
| Ref. Posture (Present) | $\alpha = 35^\circ, \beta = 20^\circ, \gamma = 150^\circ, \theta = 5.3^\circ$ | | |
| Ref. Posture (Seo[4]) | $\alpha = 0 \sim 50^\circ$ (Averaged), $\beta = 10^\circ, \gamma = 180^\circ, \theta = 0^\circ$ | | |

Table 6. Wind Tunnel Test Results (Meile[3])

| θ [°] | 0 | 5.3 | 10 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| L/D(Present) | 1.350 | 1.356 | 1.415 |
| L/D(Meile[3]) | 1.285 | 1.272 | 1.258 |
| Ref. Posture (Common) | $\alpha = 30^\circ, \beta = 20^\circ, \gamma = 160^\circ, V = 35^\circ$ | | |

Table 5에서 V 각에 따른 양항비 변화를 Seo[4]의 풍동 실험 결과와 비교하였다. 여기서, Seo의 데이터는 공력계수선도 상 표기된 실험점의 개수의 불규칙성에 기인하여 $\alpha = 0 \sim 50^\circ$ 범위에서 측정된 양항비의 평균값을 기록하였다. Table 3에서 언급한 경계 조건 및 기준 자세 (Table 5)의 차이에도 불구하고, 해석 결과가 실험값에 근사하며 양항비의 변화 추세 역시 유사한 것으로 나타났다.

Table 6은 θ 각에 따른 해석 결과와 Meile[3]의 풍동 실험 결과를 기록한 표이다. 미소 팔각 범위 ($0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$)에 대한 양항비 변화는 실험과 해석 결과에서 서로 상이한 추세가 나타났다. 이는 Fig. 10 ($0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$)에서도 관찰되는 현상으로 해당 구간에서는 받음각(α)별로 일관된 양항비의 증감을 기대하기 어려우나 그 차이는 5% 이내로 정량적 의미를 부여할 수 없는 수치이다. θ 값이 크게 증가할 경우 양항비가 완만하게 감소하는 사실을 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

IV. 결론

스키점프 선수 모델에 대한 공력 해석을 수행하여 비행 자세별 공력 특성 및 양항비를 계산하였으며 해석 결과를 기존 연구의 풍동 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 비행 자세 제어 파라미터인 받음각(α), 발목각(β), 허리각(γ), 스키각(V), 팔각(θ)을 변화시키며 전산 수치 해석을 수행한 결과, $\alpha = 10^\circ, \beta = 20^\circ, \gamma = 160^\circ$ 의 자세에서 최대 양항비가 도출되었으며, 모멘트 평형이 고려된 $\alpha \approx 10^\circ, \beta = 25 \pm 10^\circ, \gamma = 160^\circ$ 의 자세에서 우수한 공력 성능이 예측되었다. 스키각(V)은 약 $30 \sim 40^\circ$, 팔각(θ)은 약 10° 근방에서 상대적으로 높은 양항비가 나타났다. 본 연구에서 사용한 한국형 인체 모델링 해석 기법은 참고문헌[3][4]의 실험 결과에 근거하여 스키점프 비행 공력 특성 분석에 있어 적절한 기법으로 판단되었다. 해석 시, 경기 복장에 의한 영향이나 추풍 및 상대풍의 동적 변화에 대해서는 고려되지 않았으며, 향후 추풍 효과나 복장 재질과 표면 조도 간 상관관계를 연구한다면 스키점프 경기 기록 향상에 더욱 효과적인 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 1) 최규정, 권영후, "스키점프 경기 기술에 관한 운동학적 연구", 체육과학연구과제종합보고서

제1권, 1997, pp.1~22.

2) Straumann, R., "Vom Skiweitsprung und seiner Mechanik [Ski Jumping and the mechanics theory]", *Jahrbuch des Schweizerischen Skiverbandes*, Vol. 22, 1926, pp.34~64.

3) W. Meile, E. Reisenberger, M. Mayer, B. Schmölzer, W. Müller and G. Brenn, "Aerodynamics of ski jumping: experiments and CFD simulations," *Experiments in Fluids*, Vol. 41, 2006, pp.949~964.

4) K. Seo, I. Watanabe and M. Murakami, "Aerodynamic force data for a V-Style ski jumping flight" *ISEA Sports Engineering*, Vol. 7, 2004, pp.31~39.

5) B. Schmölzer, W. Müller, "Individual flight styles in ski jumping: results obtained during Olympic Games competitions" *Journal of Biomechanics*, Vol. 38, 2005, pp.1055~1065.

6) F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal*, Vol. 32, 1994, pp. 1598~1605.

7) 이보성, 김태윤, 박영희, 이동호, "ε-SST 난류 모델을 적용한 벽면 근처 정사각주 유동장의 수치 해석", 한국항공우주학회지, 제31권 제8호, 2003, pp. 1~7.

8) 김도형, "ANSYS CFX의 난류모델", 유체기계공업학회 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2006, pp.153~156.

9) E. Reisenberger, W. Meile, G. Brenn and W. Müller, "Aerodynamic behaviour of prismatic bodies with sharp and rounded edges" *Experiments in Fluids*, Vol. 37, 2004, pp. 547~558.

10) 이영숙, "제품설계를 위한 한국남성의 인체 치수 데이터", 새봄출판사, 1999.