

## CFD를 이용한 Frisbee의 공력 특성에 대한 고찰(II)

김철완\*, 장병희\*, 이장연\*

### CFD Study on Aerodynamic Characteristics of Frisbee (II)

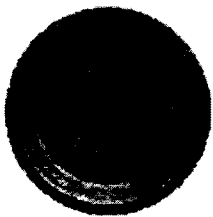
C. W. Kim, B. H. Chang and J. Y. Lee

CFD simulation was performed for 2D and 3D flying and rotating frisbees. Multiple reference method(MRF) was utilized to consider the rotation of 3D model. Geometry change of 2D model shows dramatic increase of lift, but 3D simulation results for geometry change show decrease of lift and drag. Ground effect increases the lift of the frisbee being close to ground.

**Key Words:**원반(frisbee), 전산유체역학(CFD), 항력예측(drag prediction), 고양력장치(high lift device)

#### 1. 서 론

본 논문은 CFD 기법을 이용하여 Frisbee라는 놀이 기구에 대한 공기 역학적 특성을 분석하였으며 지난 해 추계 학술대회에서 발표 했던 내용에 3차원 형상에 대한 여러 가지 해석내용을 추가하였다.

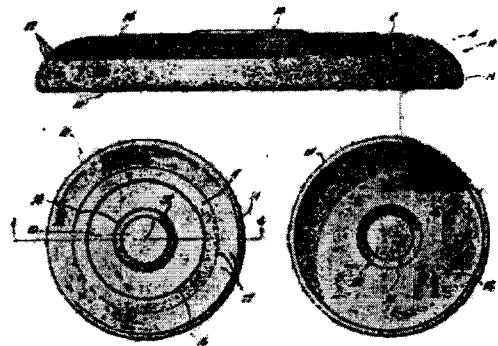


Frisbee는 매우 간편하며 쉽게 즐길 수 있는 스포츠 기구로서 전 세계적으로 그 인기를 확산시키고 있으며 많은 애호가들에게서 사랑받고 있다. 또한 disk golf, ultimate

**Fig.1** Frisbee의 유 frisbee, dog play 등 여러래인 Frisbie Baking 가지 형태의 놀이들이 생 Co의 Tin Pie Plate 기고 있다.

Frisbee의 시작은 대략 130여년 전으로 추정된다. 미국 코네티컷주의 Frisbie Baking Company

는 대학생들에게 공급하는 파이를 만들었는데 이 파이를 담았던 용기를 던지고 잡는 놀이가 대학생 사이에 유행하였고 이 용기의 바닥에 쓰여 있던 frisbie라는 단어가 이 놀이기구의 이름이 되었다. 그 후 여러 번의 발전을 거친 후에 현재와 같은 공기역학적으로 우수한 frisbee 모델은 1964년 Ed Headrick에 의해 고안되었다.



**Fig.2** 특허 등록이 된 Frisbee 도면

Fig.2는 특허 등록이 되었던 Frisbee의 단면을 보여주고 있다. Frisbee의 가장자리는 원형으로 새나 비행기의 날개처럼 양력을 발생시킬 수 있게 되어 있다. 본 연구에서는 2차원 및 3차원 frisbee

\*정회원, 한국항공우주연구원 공력성능그룹

\*E-mail : cwkim@kari.re.kr

모형에 대한 CFD 해석을 수행하여 frisbee의 공기역학적 특성을 분석하고 frisbee의 양력 및 항력변화에 영향을 줄 수 있는 형상변화를 시도하여 그 특성을 파악하고자 한다.

### 2. 수치 해석

Frisbee에 대한 수치해석은 먼저 2차원 형상에 대해 수행되었다. 2차원 airfoil 해석과 같은 방법으로 점성경계층을 형성하고 외부 유동장을 삼각 격자로 형성하여 해석을 수행하였다. 2차원 frisbee 형상 주위의 계산 격자는 Fig.3에 나타난 것과 같다.

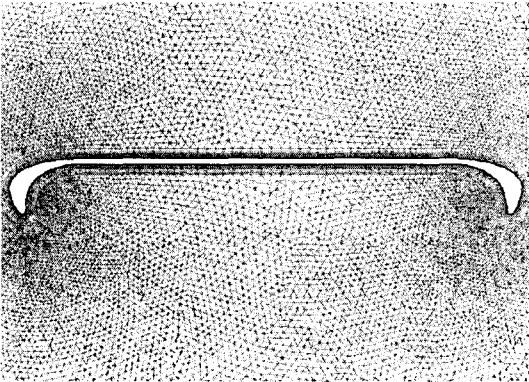


Fig.3 2차원 frisbee 주위의 계산 격자 분포

Frisbee의 비행 속도가 약 10m/s 정도로 매우 낮아 정확한 공력 특성 분석을 위해서는 층류 및 난류 영역이 혼재하는 영역을 해석하는 CFD code를 사용해야 하지만 난류로의 전이과정을 예측하는 것이 매우 어려워 전 영역을 난류로 가정한 후 해석을 수행하였다. 사용된 CFD code는 난류유동을 해석할 수 있는 non-conservative Navier-Stokes equation들을 코드화한 Fluent이다. 사용된 난류 모델은 Spalart-Allmaras one equation 모델이다. 3차원 frisbee의 해석은 비행하는 frisbee를 보다 정확히 모사하기 위해 Multiple Reference Method(MRF)를 사용하여 회전 효과를 포함하였다. Fig.4는 해석에 사용된 3차원 격자를 보여주고 있다. 점성 경계층 해석을 위해 12층의 격자를 표면에서부터 수직방향으로 형성하였다. 해석에 사용된 frisbee의 직경은 약 26cm로 흔히 사용되는 frisbee의 크기를 고려하여

정하였다. 회전효과를 고려하기위해 frisbee주위의 3차원격자를 나머지 격자로부터 구분하였는데 그 모양이 Fig.5에 나타나 있다. 그림5에 반투명하게 나타나 있는 interface 안쪽의 계산 격자는 frisbee의 회전을 고려한 경계조건을 적용받는다.

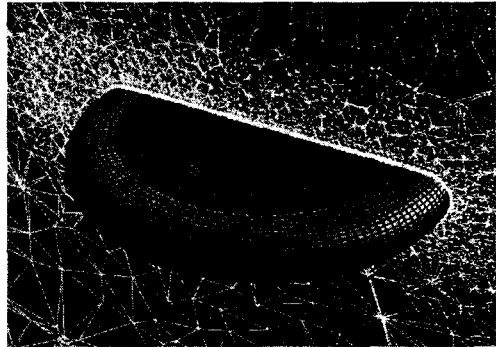


Fig.4 3차원 frisbee 주위의 격자분포

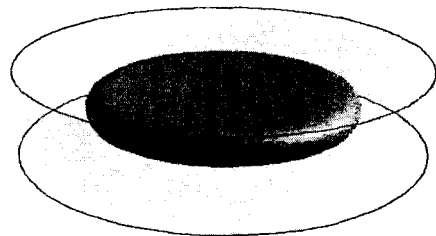


Fig.5 회전효과를 고려를 위한 frisbee 주위의 interface

### 2. 2차원 수치 해석 결과

2차원 수치해석 결과는 지난해 발표에 포함된 내용을 간략화 하였는데 frisbee의 앞전과 뒷전에 유동이 흐를 수 있는 형상 변화에 대한 해석을 포함하였다.

#### 2.1 수치 해석 결과

Fig.6은 Frisbee 주위의 압력 계수 분포를 보인 것이다. 유동의 방향을 고려하여 왼쪽 끝을 앞전 그리고 오른쪽 끝을 뒤전이라 부른다. 앞전에서 유동이 가속되어 frisbee의 윗면은 전체적으로 저압이 형성되고(Fig.6) 아랫면은 Frisbee의 형태로 인해 유동이 회전하는 recirculation 영역이 크게

형성된다(Fig.6). 따라서 아랫면의 압력이 윗면에 비해 크게되어 frisbee는 양력을 발생한다. 아랫면의 압력분포를 자세히 살펴보면 앞전에 가까운 부분은 비교적 낮은 압력이 형성되고 뒷전에 가까울수록 높은 압력이 형성됨을 알 수 있다. 따라서 이에 의해 발생하는 피칭 모멘트는 frisbee의

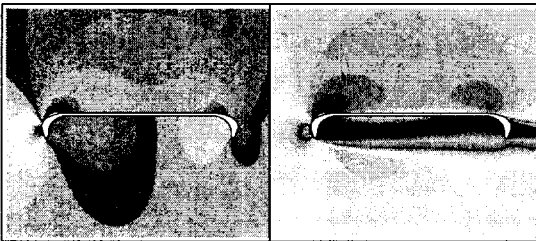


Fig. 6 Frisbee 주위의 압력 및 속도 분포

nose를 아래로 떨어뜨리려는 경향을 갖는다. 만일 frisbee의 회전으로 인한 angular momentum이 없다면 frisbee는 안정된 비행이 불가능하다.

### 2.2 형상 변화에 대한 해석

2차원 모델에 대해 형상 변경을 시도하여 수치 해석을 행한 후 그 결과를 기본 형상(H0)과 비교하였다. Frisbee의 앞전과 뒷전에 유동이 흐를 수 있는 구멍을 만들어(형상 H1) 수치해석을 진행하였다(Fig.7). Frisbee 아랫면의 recirculation 영역은 기본 형상보다 감소하고 고압의 압력 분포는 약간 감소하는 결과를 보인다. 표2에는 각 형상에 대한 양력 및 항력계수 값들을 비교하였다.

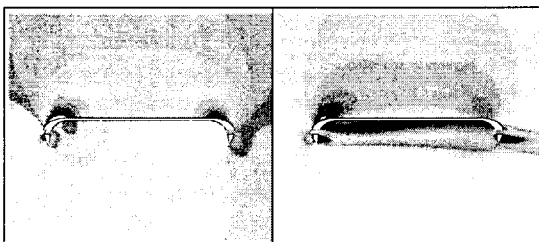


Fig.7 형상H1 주위의 압력 및 속도 분포

기본 형상보다 항력계수의 증가는 미미한데 반해 양력 계수는 크게 증가하는 결과를 얻었다. 이 결과에 대한 또 다른 설명은 H1형상은 leading edge slat 및 trailing edge flap을 갖는 airfoil과

매우 흡사하여 양항비를 증가시키는 것이다. 다른 점은 airfoil의 경우 윗면의 유동 변화를 유도하지만 H1은 frisbee 아랫면의 유동에 변화를 주는 점이다.

	양력 계수	항력 계수	양항비
기본 형상	0.4838	0.0789	6.13
형상 H1	0.7944	0.0836	9.50

Table 1 각 형상에 따른 양력 및 항력계수 비교

### 3. 3차원 수치 해석 결과

3차원 해석은 기본형상에 대한 해석, 형상 변화 시 보이는 공력특성의 변화 및 ground effect에 대한 해석을 포함하고 있다.

#### 3.1 기본 형상에 대한 수치해석 결과

3차원 frisbee 주위 유동 현상도 2차원 수치 해석 결과와 크게 다르지 않다. 그림8은 frisbee 윗면과 아랫면의 압력분포를 보여주고 있다. 받음각

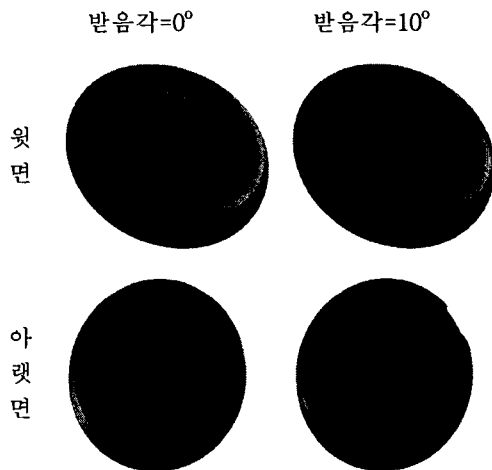


Fig.8 받음각에 따른 Frisbee의 압력분포

이 증가하면 앞전의 윗면에 매우 큰 저압 피크가 발생하고 아랫면의 뒷전부분에 높은 압력이 작용하여 양력을 증가시킨다. 그림9는 받음각을 변화시키며 측정된 양력, 항력 및 피칭 모멘트 값을

나타낸 것이다. 최소 항력은 받음각이 약  $-4^\circ$  일 때 발생하고 받음각이 증가할 수록 양력과 피칭모멘트는 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 frisbee는 일정 거리를 비행한 후 속도가 줄고 회전력도 감소하여 양력이 줄고 회전속도도 감소하면 비행을 계속하기 어려운데 frisbee의 받음각이 증가하여 필요한 양력을 추가로 확보하고 피칭모멘트도 줄여 지면에 닿을 때까지 비행을 안전하게 하도록 한다.

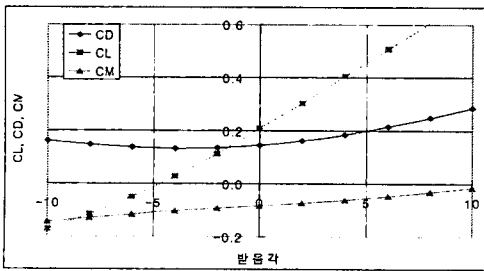


Fig.9 받음각 변화에 따른 공력 계수 변화

Fig.10은 받음각이 없을 때 frisbee의 회전속도를 변화시키며 측정한 양항비 및 피칭 모멘트를 보인 것이다. 가로축은 spin rate를 나타낸 것으로서 원반 끝의 회전 속도를 frisbee의 비행속도로 나눈 값이다. Spin rate가 증가 할수록 양항비가 증가하고 0.3 이상에서 양항비가 일정하게 되며 spin rate가 증가할수록 피칭모멘트는 감소함을 알 수 있다.

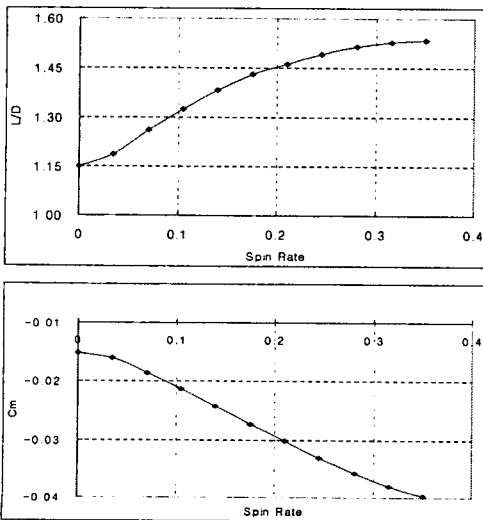
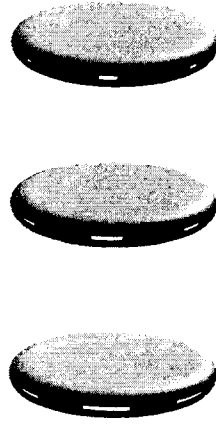


Fig.10 Spin rate 변화에 따른 공력 변화

3.2 형상 변화에 대한 해석



왼쪽에 보이는 형상들은 frisbee의 옆면에 유동이 흐를 수 있는 사각 구멍들이 공력특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 준비한 것들이다. 사각구멍의 높이는 8mm이고 형상 P1의 너비는 전체 원둘레의 1/5, P2는 1/3 그리고 P3는 1/2로 정하였다. 또한 구멍의 수는 8개로 등간격으로 배치하였다. 이 형상들에 대한 수치해석은 회전 속도를 300rpm으로

고정한 후 받음각을 변화시키며 공력 특성을 측정하였고 받음각을  $0^\circ$ 로 하여 spin rate에 따른 특성 변화를 분석하였다.

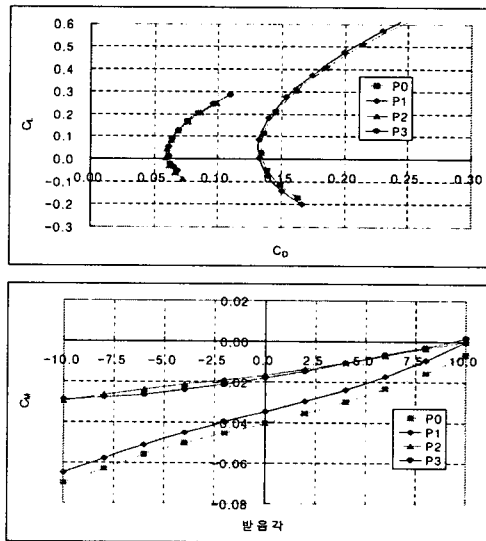


Fig.12 받음각 변화에 따른 공력특성 변화

Fig. 12는 각 형상들의 공력 특성을 비교하여 보여주고 있다. 형상 P1의 공력특성은 기본 형상 P0와 크게 다르지 않지만 P2와는 큰 차이를 보인다. P1 형상 사각 구멍의 너비가 전체 원둘레의 1/5인데 이는 형상변화에 의한 공력 특성 변화를

관찰하기에는 작음을 의미하고 P2는 1/3인데 이는 너무 큼을 의미한다.

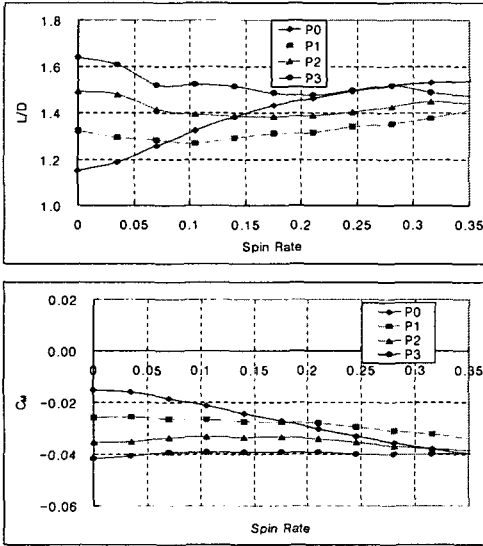


Fig.13 Spin Rate에 따른 공력특성 변화

앞에서 설명한 것처럼 spin rate에 따른 변화는 기본형상의 경우 크게 보이지만 P1, 2, 3 모두 큰 변화는 보이지 않는다. P3의 경우 양항비는 대부분의 spin rate에서 큰 값을 일정하게 유지하지만 발생하는 양력이 비행에 필요한 양력에 미치지 못할 가능성이 많아 이를 보완할 추가적인 형상 변화가 필요하다고 판단된다.

### 3.2 지면 효과에 의한 공력특성 해석

Frisbee가 지면에 가까이 위치하여 비행하면 지상효과에 의한 공력 변화를 예상할 수 있는데 이를 해석을 통해 확인하기 위해 frisbee를 300rpm으로 회전하며 여러 위치에 대해 해석을 수행하였다. 이 해석에 사용된 형상은 기본형이고 흐름 속도는 24m/s로 하였다. 지면에는 slip condition을 적용하였고 frisbee 아래 영역에는 계산 격자를 밀집시켰다. Fig.14는 frisbee의 비행 높이에 따라 나타나는 양항비를 비교하였다. 높이 40cm 이상에서는 거의 지면 효과를 관찰할 수 없고 높이가 20cm이하에서 현저한 지면효과를 관찰할 수 있다. Frisbee가 지면에 가까이 근접하여 비행하면 지면효과에 의해 많은 양력을 발생하고 따라서 더 먼 거리를 비행할 수 있음을 확인하였다.

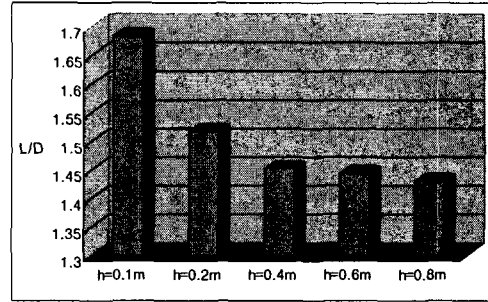


Fig.14 Frisbee의 고도에 따른 양항비 비교

## 4. 결 론

Frisbee에 대한 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하여 frisbee의 공기역학적 특성을 분석하였다. 2차원 형상의 앞전과 뒷전에 구멍을 내어 유동이 흐르게 하였을 때 양항비가 크게 증가하는 결과를 얻었다. 또한 3차원 형상에서도 이와 비슷한 결과를 얻었지만 양력이 감소하여 이를 보완할 형상의 변화가 필요하다. Frisbee가 지면에 가까울수록 지면효과에 양력이 증가하였다.

## 참고문헌

- [1] Hummel, S., "Frisbee Flight Simulation and Throw Biomechanics", M. S. Thesis, Univ. of California at Davis.
- [2] Bowles, R. I., "Transition to Turbulent Flow in Aerodynamics," The Royal Society, A (2000) 358, pp.245-260.
- [3] Krumbein, A., "Transitional Flow Modeling and Application to High-Lift Multi-Element Airfoil Configurations," Journal of Aircraft, Vol. 40, No. 4, pp.786-794.
- [4] Crouch, J. D., Crouch, I. W. M., and Ng, L. L., "Transition Prediction for Three-Dimensional Boundary Layers in CFD Applications," AIAA Journal, Vol. 40, No. 8, pp.1536-1541.
- [5] Herbert, T., 1997, "Parabolized Stability Equations," A. Rev. Fluid Mech. 29, pp. 245-283.