

2D 플라잉 디스크의 피칭 운동에 따른 비정상 유동 해석

박 다 운¹, 김 태 옥¹

¹건국대학교 항공우주정보시스템공학과

본 연구에서는 플라잉 디스크를 이용하여 Pitching 운동 조건에서의 공력특성을 해석하였다. 본 해석에서 사용한 플라잉 디스크 모델은 프리원 151_140이며, 해석자로는 KFLOW_EDISON_2D_3DOF를 사용하였다. Pitching 운동이 있는 경우 받음각의 변화에 따른 공력특성을 비교 분석하였다. 기준 받음각의 변화에 따라 형상 아랫면과 뒷전 부근에 실속 와류가 다른 형태로 생겨 플라잉 디스크의 공력 특성에 영향을 준다는 것을 확인하였다. 또한, 기준 받음각이 증가 할수록 강한 실속 와류가 발생함을 알 수 있다.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 플라잉디스크(Flying Disc), 떨림운동(Wobble), 환산진동수(Reduced Frequency), 박리거품(Separation Bubble), 와류방출(Vortex Shedding), 와류(Vortex)

1. 서 론

국내에 Frisbee로 잘 알려져 있는 플라잉디스크는 플라스틱 원반을 던지는 것으로 원반의 모양과 진행 방식에 따라 다양한 세부 종목으로 나뉜다. 국내에서는 아직까지 대중화 되지는 않았지만, 누구나 쉽게 할 수 있는 스포츠로 현재 학교, 유아 및 노인 체육과 특수 체육에서도 많이 활용되고 있다. 플라잉 디스크에도 IoT(Internet of Things)를 적용해 ‘스마트 플라잉 디스크’로써 신체 활동 능력 증진 및 오락적 요소를 증대시킬 수 있다. 이를 통해 급속도로 대중화가 이뤄지고 있는 드론 산업처럼 충분히 대중화될 수 있고 활용폭도 넓어질 수 있다. 정교한 스마트 플라잉 디스크 제어와 일반인들도 쉽게 접하고 잘 날릴 수 있는 최적의 형상 설계를 위해 공기역학적 해석이 필요하다. 우선적으로 비행 성능 향상을 위한 공력 데이터베이스 구축을 통한 비행 동역학 모델 정립이 이루어져야 한다.[1-4] 따라서 본 연구에서는 2차원적으로 KFLOW_EDISON_2D3DOF 해석자를 이용해 동적 계수인 C_{M_y} 를 얻어 데이터베이스를 구축하고, 동일한 받음각에서 pitching 운동이 공력특성에 미치는 영향 및 받음각의 변화에 따른 유동현상을 비교 분석하였다.

2. 본론

2.1 배경 이론

평면에서 기준 받음각(α_{mean})의 함수로 정의되는 조화 운동은 식 (1)과 같이 정의 된다. [5-6]

$$\alpha(t) = \alpha_{amp} \sin(kt^*) \quad (1)$$

여기서 t^* 는 무차원 시간으로 $\omega t = k^* t^*$, $t^* = \frac{tU_\infty}{c}$ 이고,

k 는 무차원 진동수로 식 (2)와 같이 정의된다.

$$k = \frac{\omega c}{U_\infty} = \frac{2\pi f c}{U_\infty} \quad (2)$$

2.2 해석 모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 프리원 151_140 모델의 형상을 나타내고 있다. 이 형상의 외경은 0.202m, 상부 중심의 두께는 0.0203m이며, 윗면은 동심원으로 이루어진 곡면의 형태이다. 플라잉 디스크에서는 가장자리를 연결한 선을 시위선이라 하며, 유동이 +x로 흐른다고 했을 때, 유동이 들어오는 쪽 가장자리를 앞전(LE, Leading Edge), 흘러나가는 쪽 가장자리를 뒷전(TE, Trailing Edge)이라 한다. y축에 대해 대칭이므로 무게 중심은 x=0 인 지점이 된다.

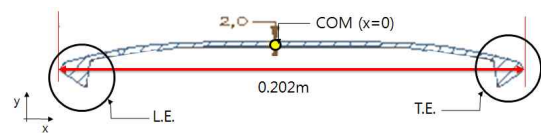


Fig. 1 A cross-sectional 151_140 profile

2.3 격자 설정

격자의 수렴성을 검토하기 위하여 95,120개, 69,856개의 격자수를 가진 격자를 이용하였다. 격자 테스트를 통해 격자의 크기가 유동의 경향성과 박리거품 예측에 미치는 영향을 Fig. 2를 통해 확인한 결과, 계산의 효율성과 정확성을 고려하였을 때 95,120개의 격자수를 가진 격자가 가장 적합하다고 판단되

었다. Fig. 3은 해석에 사용한 격자의 형상을 보여주고 있다.

격자는 자유류의 흐름과 레이놀즈수를 고려하여 첫 번째 격자점까지의 높이를 1.0×10^{-5} 로 설정 하였으며, 원방 경계의 반지름은 시위선의 30배로 설정하였다. 원방 경계 조건은 Riemann invariant 경계 조건을 적용하였고, 벽면은 단일 점성 경계 조건으로 설정하였다.

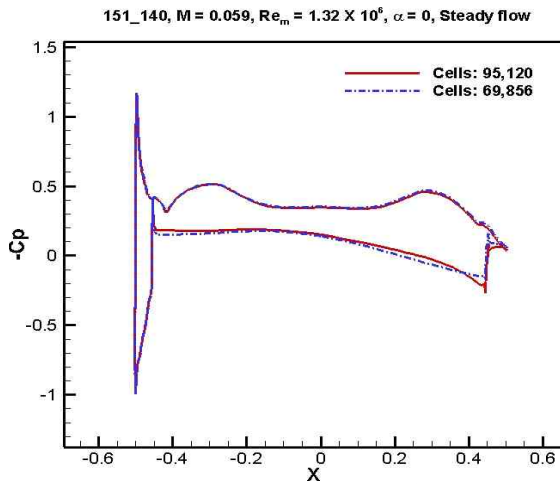
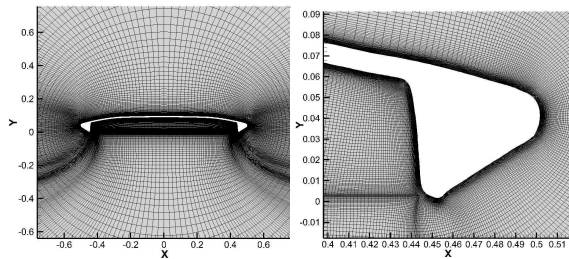


Fig. 2 The grid test on the number of cells



(a) Mesh of the total figure (b) Mesh of the edge
Fig. 3 Mesh of 151_140

3. 유동 해석 조건 및 결과

3.2 유동 및 해석 조건

플라잉 디스크를 던질 때, 이에 가해지는 진동은 제어하기 힘든 반면, 받음각에 변화를 주어 던지는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 진동수(K, reduced frequency)를 변화시키기 보다는 받음각에 변화를 주어 그에 따른 공력특성을 분석하였다. 플라잉 디스크 해석의 유동 조건 및 계산 조건은 Table 1과 같다. 받음각 -5° 부터 45° 까지 5° 간격으로 정상 계산을 수행하였고, 받음각 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 에서 z축을 기준으로 $\pm 5^\circ$ 의 진폭으로 진동하여 비정상 계산을 수행하였다. 진동하는 플라잉 디

스크의 공력 특성을 해석하기 위해 익형 3차 유도 운동 유동 해석 소프트웨어인 KFLOW_EDISON_2D3DOF를 이용하였다.

Table 1 Simulation conditions

Parameter	Value
AOA	$-5^\circ \sim 45^\circ$ (5°)
AOA(Pitch)	$0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$
The amplitude of AOA	5°
M	0.059
Re/m	1,320,752/m
Turbulent Viscosity Ratio	0.1
Turbulent Intensity	0.01
Reduced Frequency (based on chord)	0.44
Flux scheme	Roe-flux
Limiter	Van-Leer
Turbulent model	$k-\omega$ SST

3.3 해석 결과

3.3.1 피치 운동이 없는 경우

Fig 4는 피치 진동 운동이 없을 때 받음각($-5^\circ \sim 45^\circ$)에 따른 C_L 값을 나타낸 그래프이다. 이를 살펴보면 약 25° 에서 실속이 발생하는 것을 알 수 있다. 실속이 발생한 이후부터 C_L 값이 급격하게 낮아지고 있다.

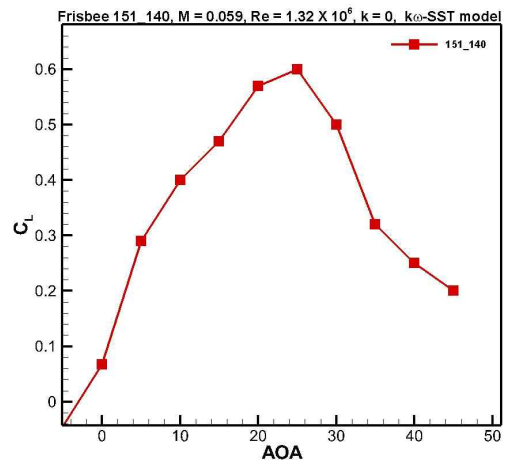
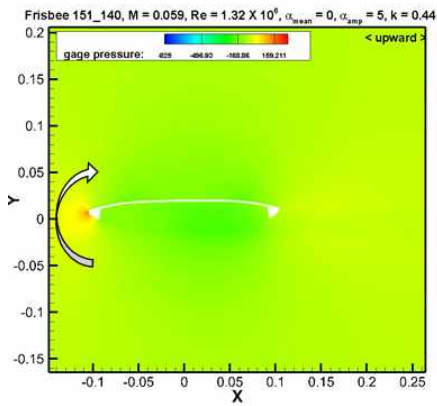
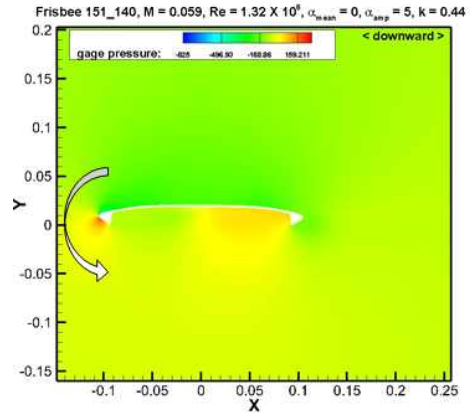


Fig. 4 C_L of '151_140' with various angle of attack (no pitch movement)

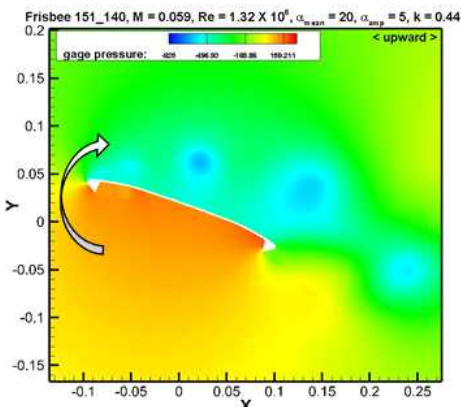
3.3.2 피치 운동이 있는 경우



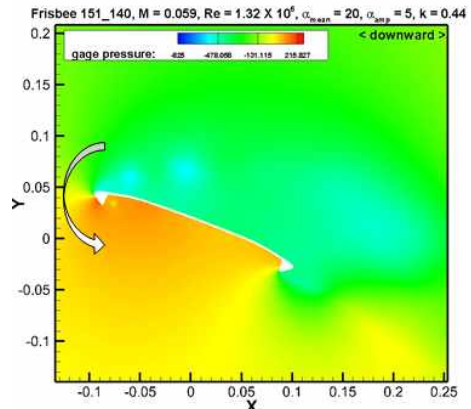
(a) $AOA=0^\circ$



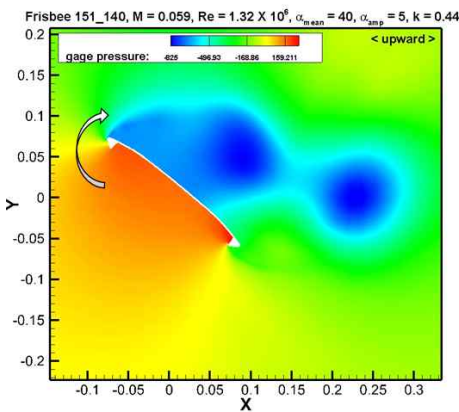
(a) $AOA=0^\circ$



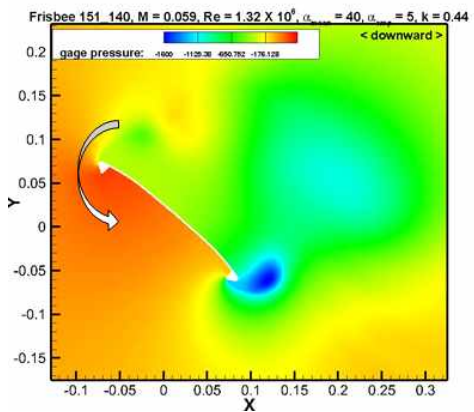
(b) $AOA=20^\circ$



(b) $AOA=20^\circ$



(c) $AOA=40^\circ$



(c) $AOA=40^\circ$

Fig. 5 Pressure fields
 (up-stroke, $\alpha_{amp} = 5^\circ$, $k = 0.14$)

Fig. 6 Pressure fields
 (down-stroke, $\alpha_{amp} = 5^\circ$, $k = 0.14$)

Fig. 5과 Fig. 6은 기준 받음각 0°, 20°, 40°에서 피치의 변화각이 증가/감소하고 있을 때 압력 분포를 gage pressure로 나타낸 것이다. Fig. 5-(a), Fig. 6-(a)을 살펴보면 받음각 0°에서는 유동 박리가 거의 생기지 않는다.

Fig. 5-(b), Fig. 6-(b)에서 기준받음각 20°을 보면 올라갈 때 앞전에서 박리 거품이 발생하고 그 뒤로는 이전에 발생했던 거품들이 점점 떨어져 나가는 모습을 확인 할 수 있다. 앞전이 앞으로 내려가고 뒷전이 위로 올라가면서 뒷전이 이전에 방출되었던 와류들을 분산시키고 이로 인해 뒷전 부근의 압력이 올라갈 때에 비해 낮은 것을 확인 할 수 있다. 또한 앞전에 여러 작은 와류들이 생기는 것을 알 수 있다.

Fig. 5-(c), Fig. 6-(c)를 통해 받음각 40°에서는 올라가는 방향일 때 플라잉 디스크의 뒷면 대부분에서 유동 박리가 발생하여 완전 실속 상태에서 진동하는 것을 확인 할 수 있다. 세 받음각 중 박리가 발생하는 길이가 가장 길고, 플라잉 디스크 뒷면에 발생하는 실속 와류의 크기와 강도가 상대적으로 매우 크기 때문에 쉽게 소멸되지 않고 다음 유동에 의해 발생하는 실속 와류에 합쳐져서 더 큰 와류를 생성한다.

또한 앞전이 내려가고 뒷전이 올라가면서 이전에 발생했던 와류에 뒷전이 위치하게 되면서 유동이 플라잉 디스크 뒷전 하부로 순환해 들어간다. 세 받음각 모두 플라잉 디스크가 내려오면서 하부 공동에 발생하는 와류의 발생 위치가 점점 앞전으로 이동하며 크기도 작아진다. 또한 플라잉 디스크가 올라갈 때 하부에 전체적으로 발생했던 실속 와류가 내려오면서 점차 앞전과 뒷전으로 분리되는 것을 모든 결과에서 공통적으로 확인 할 수 있다.

Fig. 7-(b)는 $\alpha_{amp} = 5^\circ$ 이므로 $\alpha_{mean} = 20^\circ$ 일 때는 실속이 발생하는 25° 까지 도달하게 되는 상황을 나타낸다. Fig. 5-(b), Fig. 6-(b), Fig. 7을 통해 유동이 박리 되었다가 재부착되고 α_{amp} 가 증가하는 과정에서 다시 실속와류가 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

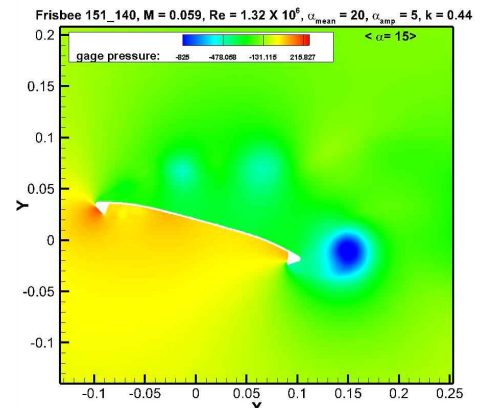
4. 결 론

본 연구에서는 2차원 플라잉 디스크 단면을 활용하여 피치 운동에 대한 공기 역학적 특성을 KFLOW_EISON_2D3DOF를 이용해 정상, 비정상, 비압축성 계산을 수행하였다.

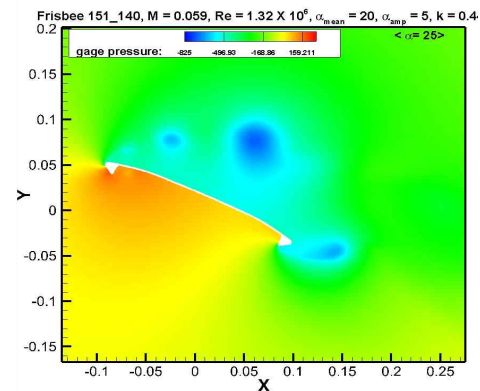
실속이 발생하지 않은 상태, 실속의 경계, 완전 실속상태에서 피치 운동이 발생했을 때 유동 해석 결과를 살펴보면, 실속이 발생했을 때 상대적으로 유동 박리 및 실속 와류가 더 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 2차원 형상만을 이용하여 해석을 수행하였다. 본 계산 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 3차원 형상에 대한 해석 결과 및 실험적인 공력 특성 데이터가 수반되

어야 한다고 판단된다.



(a) $\alpha_{mean} = 20^\circ$, $pitch_alpha = -5^\circ$



(b) $\alpha_{mean} = 20^\circ$, $pitch_alpha = +5^\circ$

Fig. 7 Pressure fields when pitch amplitude max out

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

References

- [1] 2003, Sarah Ann Humvel, "Frisbee Flight Simulation and Throw Biomechanics," PhD Thesis. University of California Davis.
- [2] 2000, Hubbard, M. S. A. Hummel, "Simulation of frisbee

- flight.", Proceedings of the 5 th Conference on Mathematics and Computers in Sport, University of Technology.
- [3] 2002, J.R. Potts, W.J. Crowther, "Frisbee Aerodynamics", AIAA 2002 Frisbee Aerodynamics, pp. 1-5.
 - [4] 1972, G. D. Stille, D. L. Carstens, "Adaptation of Frisbee flight principle to delivery of special ordnance", AIAA pp. 72-982.
 - [5] 2003, 박수형, "Navier-Stokes 방정식을 사용한 동안정 미계 수 예측기법", PhD Thesis. KAIST.
 - [6] 2014, 전상인, 사정환, 박수형, 변영환, "천이 전달 방정식을 이용한 진동하는 익형의 동적 실속의 해석." J. Comput. Fluids Eng. Vol 19.1, pp. 80-86.