

## 회전타원체 보빈 형상의 거동에 관한 연구

### A Study on the Behavior of Spheroid Configuration Bobbin

강 승 희\*      안 성 호\*\*      임 완 권\*\*      김 혜 응\*\*\*  
Seung-Hee Kang      Sung-Ho Ahn      One-Kwon Rim      Hyeung Kim

#### Abstract

The initial trajectory of a spheroid configuration bobbin for precision guidance has been investigated by analyzing its aerodynamic load and six-degree-of-freedom motion. The effects of changes in the spheroidal head configuration, flow angle and lateral center-of-gravity offset are numerically studied using the commercial software "FLUENT". A wind tunnel test is also conducted to validate the numerical scheme and to examine effect of the Reynolds number on the flow around the bobbin. It is shown that the size of the separation bubble formed on the surface decreases significantly when the Reynolds number is varied between 110,000 and 140,000. At a zero flow angle, an oblate spheroidal head shows relatively moderate rotation while a prolate spheroidal head shows rapid rotation. The bobbin with a spherical head shape has little effect on the flow direction; however, the oblate bobbin is sensitive to the flow angle. The roll motion of the bobbin is greatly influenced by the lateral center-of-gravity offset and maximum dispersion is observed at half of the radius.

Keywords : Bobbin(보빈), Graphite Bomb(탄소섬유탄), Trajectory(탄도궤적), Wind Tunnel Test(풍동시험)

#### 1. 서론

전기가 잘 통하는 전도성 섬유가 전선과 변압기 등 전력시설을 휘감으면 전력망에 과부하가 걸려 단전되고 결국 전력시설 자체를 사용하지 못하게 된다. 현대전에서 C4I 체계를 운영하기 위해서는 안정적인 전력 공급이 필수적 요소이므로 전력 시설을 마비시킴으로

서 레이더 등의 초계 장비는 물론 통신체계까지 제대로 사용할 수 없도록 만들 수 있다. 이러한 목적으로 사용되는 폭탄을 탄소섬유탄(graphite bomb) 또는 정전 폭탄(blackout bomb) 이라한다<sup>[1]</sup>.

참고문헌 [1]에 의하면 이 폭탄 안에는 여러 개의 자탄(自彈)이 들어있고, 이 자탄 안에는 탄소섬유가 감겨있는 작은 크기의 보빈(bobbin)이 수십개 들어있다. 이 폭탄은 고공에서 투하되며, 투하된 폭탄은 곧 수십 개의 자탄으로 나뉘는데, 자탄은 내장된 낙하산을 펴고 서서히 내려온다. 자탄은 공격 목표 위 상공에서 터지게 되고, 자탄 안에 들어 있던 전도성 섬유가 거미줄처럼 격자 형태를 만들어 전선과 변압장치 등을 휘감게 된다. 이러한 종류의 폭탄은 미국이 1991년

† 2010년 6월 7일 접수~2010년 8월 6일 게재승인

\* 전북대학교(Chonbuk National University)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

\*\*\* 전북대학교 대학원

책임저자 : 강승희(ksh@jbnu.ac.kr)

‘사막의 폭풍’ 작전에서 사용하여 이라크 전력시설의 85%를 파괴시켰고, 1999년 5월 유고슬라비아 내전에서는 BLU-114/B 자탄이 들어있는 CBU-94 정전폭탄을 사용하여 세르비아 지역 70%를 정전시켜 약 20여 시간 C4I체계를 마비시킨 것으로 알려져 있다<sup>[1]</sup>.

그러나 이 폭탄은 정밀한 유도가 어렵다는 단점이 있는 것으로 알려져 있어 자탄에서 분리되는 필라멘트가 효과적으로 전력시설을 휘감게 하기 위해서는 정확한 섬유 격자 형상을 예측해야 한다. 이를 위해서는 보빈에 대한 공력 연구 및 탄도 궤적 예측 연구가 우선적으로 요구된다.

본 연구에서는 상용 전산유체역학 프로그램인 FLUENT를 사용한 수치적 연구를 통하여 회전타원체 보빈 형상에 대한 공력 해석 및 비정상 공기력에 의한 6-자유도 거동 변화를 연구하였다. 또한 사용된 프로그램의 검증 및 레이놀즈 수 영향을 파악하기 위해 풍동시험을 수행하였다.

## 2. 수치적 연구

본 연구에 사용된 회전타원체 보빈 형상은 원형실린더에 1:1 회전타원체 형상인 반구가 부착된 형상을 기본형상으로 (이하 기본형상이라 한다) Fig. 1에서 보는 바와 같이 회전타원체의 극축의 길이, 무게중심 그리고 보빈 수두 형상 등에 변화를 가하여 나타난 공력 특성 및 초기 낙하거동 특성 연구를 수행하였다. 2:1 회전타원체 형상은 회전타원체 부분의 극축의 길이를 기본형상의 2배로 키운 형상이며, 0.5:1 회전타원체 형상은 극축의 길이를 반절로 줄인 형상이다. 모든 보빈의 직경은 0.017m, 보빈 두부 부분을 제외한 원형실린더 부분의 길이는 0.036m, 무게는 0.005kg을 그리고 보빈의 운용조건은 70m/s를 기준으로 연구를 수행하였다.

보빈 유동장 주위의 비정상 유동 문제를 해석하기 위해 본 연구에서는 상용소프트웨어인 FLUENT v. 6.3을 사용하였다. 보빈 주위의 정상 및 비정상 유동장을 해석하기 위해 FLUENT내의 pressure based solver를 사용하여 층류유동에 대해 계산을 수행하였다. 공간에 대해서는 3차 정확도의 MUSCL 기법을 시간에 대해서는 내재적 기법(implicit method)을 사용하였다. 경계조건으로는 입구영역에서는 velocity inlet을 출구는 pressure out 조건을 사용하였으며 원방영역(far-field)은

대칭조건을 사용하였다. 비정상 공력에 의한 보빈의 병진운동과 회전운동 변위는 FLUENT 내의 6-자유도 모듈을 사용하였다<sup>[2]</sup>.

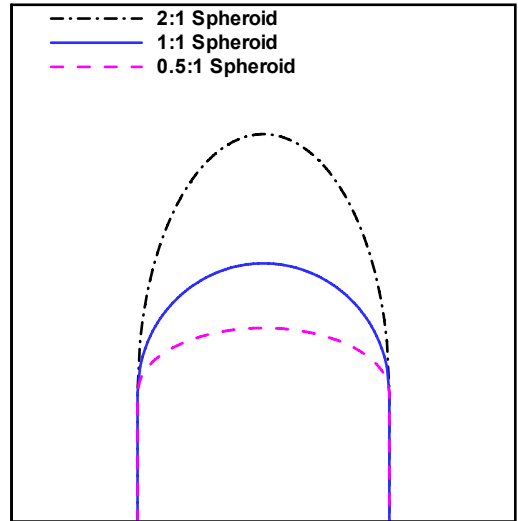


Fig. 1. 보빈 형상 단면도

본 연구에 사용된 회전타원체 보빈 형상 주위의 격자는 격자 생성 소프트웨어인 GAMBIT을 사용하여 생성하였다. 형상 표면은 삼각격자와 사각격자를 혼합하여 사용하였으며 형상 주위의 점성 경계층을 효과적으로 계산하기 위해 프리즘 격자를 사용하였다. 외부 영역은 형상의 거동 변화에 따른 격자의 변형 및 생성을 적절히 수행할 수 있도록 피라미드 격자를 사용하였다. 본 연구에 사용된 격자수는 약  $1.6 \times 10^6$ 이며 Fig. 2에 기본형상 주위의 격자를 나타내었다<sup>[3]</sup>.

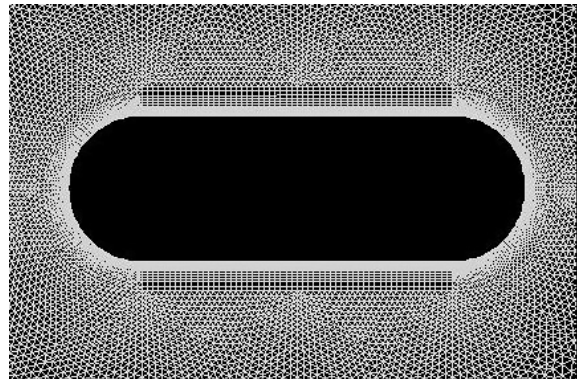


Fig. 2. 보빈 형상 주위격자

### 3. 풍동모형 및 시험

본 연구에서 사용된 프로그램의 검증과 레이놀즈 수 변화에 대한 영향을 파악하고자 기본형상 보빈에 대한 풍동시험을 수행하였다. 모형은 표면에 압력공 설치가 용이하도록 실물의 네 배 크기의 반절모형으로 제작되었다.

본 시험에 사용된 풍동은 전북대학교 항공우주공학과 아음속풍동으로 폐회로 단일순환식이며 수축비는 6.25이다. 시험부는 0.6m(폭) × 0.4m(높이) 크기의 직사각형의 각모서리에 0.05m의 모서리 판이 있는 형태의 개방형 시험부(open test section)이다. 풍동의 최대속도는 46m/s이며 난류도는 0.3%이내이다. 저속풍동의 유로는 강철로 구성되어 있으며 팬은 축류형으로 DC 모터에 의해 구동된다.

모형은 Fig. 3에 보는 바와 같이 풍동 바닥면으로부터 모형 주위로의 흐름을 차단하고자 앞부분에 45° 썸(wedge)을 준 평판위에 설치하였다. 또한 평판의 앞전으로부터 발생하는 경계층이 모형에 영향을 주지 않도록 하기 위해 보빈 중앙부와 동일한 형상의 두께 20mm 분리판을 설치하였다<sup>[4,5]</sup>. 모형의 표면압력 분포는 64개의 압력을 동시에 측정할 수 있는 PSI사의 ESP 모듈(ESP-64HD ±2,500Pa(±10"W.C.))과 PSI-8400 시스템을 사용하여 측정하였다. 압력공은 중심부에 길이방향(X 방향)으로 23개 위치, 횡방향(Y-방향)으로 11개 위치에 설치하였다.

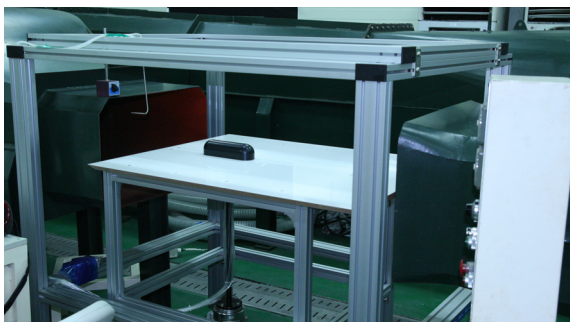


Fig. 3. 풍동시험 장면

### 4. 결과 검토

#### 가. 풍동시험

옆미끄럼각(sideslip angle)이 0도 조건에서의 레이놀

즈 수 영향에 대한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 여기에서 속도는 풍동 모형의 속도를 기준으로 나타낸 것으로 실제 보빈 운용속도로 환산 시에는 네 배의 크기가 된다. 길이방향의 거리는 보빈의 직경(X/D)비로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 보빈의 중앙 길이 방향으로의 압력 분포는 보빈 전반부 회전타원체 부위에서의 흐름 가속으로 인하여 압력계수가 낮아짐을 볼 수 있다. 또한 전반부 회전타원체 부위와 실린더 부위가 연결되는 부근 영역에서 레이놀즈 수가 작아질수록 압력계수의 값이 작아지는 현상을 볼 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 작은 경우 점성력이 상대적으로 크게 되어 이 영역에서의 흐름 박리(separation)와 재부착 현상에 의하여 박리버블(separation bubble)이 생성되고, 이러한 버블은 흐름 가속 영역을 확장시켜 보빈 표면에서의 압력을 낮게 하는 것으로 판단된다. 이러한 특성은 레이놀즈 수 약 110,000 이상에서 박리버블의 소멸 등으로 인하여 일정한 값으로 수렴해 감을 볼 수 있었다. 보빈의 후류가 존재하는 후반부 영역의 경우는 레이놀즈 수가 증가 할수록 압력계수가 작아짐을 볼 수 있는데 이는 후류 영역에서 층류 흐름(laminar flow)이 레이놀즈 수가 증가함에 따라 에너지가 큰 난류 흐름(turbulent flow)으로 변화함에 따라 후류에서의 버블의 크기가 상대적으로 작게 되어 주위 흐름이 상대적으로 가속화되어 발생하는 문제로 예측된다. 이러한 보빈 후반부에서의 후류 압력계수 감소 현상은 레이놀즈 수 약 140,000 이상에서 수렴해가는 특성을 보였다.

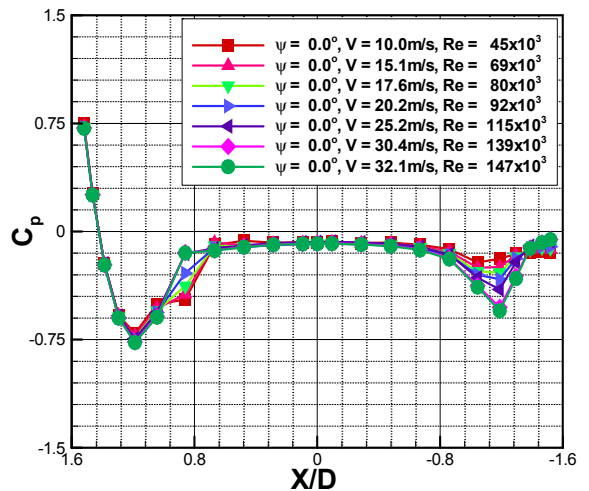
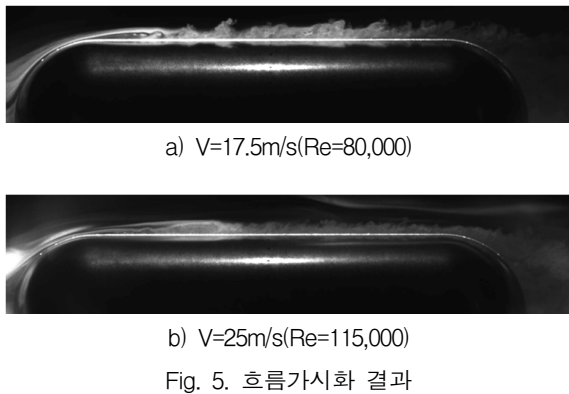


Fig. 4. 레이놀즈 수 영향

연기발생기와 Nd-Yag 레이저를 활용한 흐름가시화 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 속도, 즉 낮은 레이놀즈 수 영역에서는 보빈의 전반부인 회전타원체 부분과 실린더 부분의 연결 부위에서 흐름의 박리 및 재부착 현상에 의해 박리버블이 생성되어 있음을 확인 할 수 있었고 이러한 버블은 주위 흐름을 가속시켜 Fig. 4에서 보는 바와 같이 보빈 표면에서의 압력을 감소시킴을 확인할 수 있었다. 버블은 레이놀즈 수가 증가할수록 작아지며 레이놀즈 수 약 110,000 이상에서는 소멸되어 관찰되지 않음을 확인 할 수 있었다. 또한 흐름이 가속되는 보빈의 전반부 회전타원체를 제외하면 박리버블 후류 방향으로 작은 크기의 와류 들이 비정상적으로 발생되어 후류 방향으로 전파되는 현상을 볼 수 있었다. 이러한 와류의 생성 및 후류방향으로의 전파는 결과적으로 보빈의 비정상 압력분포를 유발하게 되고 이러한 비정상 압력에 의해 보빈의 동적 낙하거동에 지대한 영향을 줄 것으로 예측된다.



나. 전산유체역학 기법의 검증

기본형상 보빈에 대한 계산 결과를 검증하기 위해 표면에서의 압력분포를 계산하여 풍동시험 결과와 비교하였다. 압력분포는 비정상 상태로 계산하여 그 평균값을 사용하였으며 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 FLUENT의 계산 결과는 보빈의 후반부 일부를 제외하면 전 영역에서 풍동시험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

다. 기본형상 및 무게중심 변화에 따른 거동 특성

기본형상 보빈의 비정상 공력에 의한 수평 및 수직 낙하거동을 Fig. 7 그리고 각 거동 변화를 Fig. 8에 나

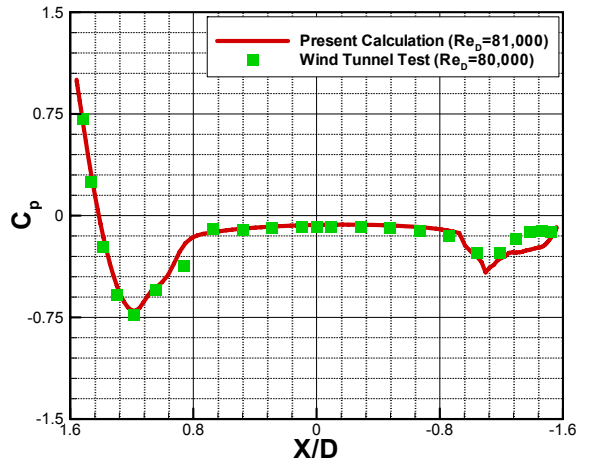


Fig. 6. 풍동시험과 계산결과 비교(기본형상)

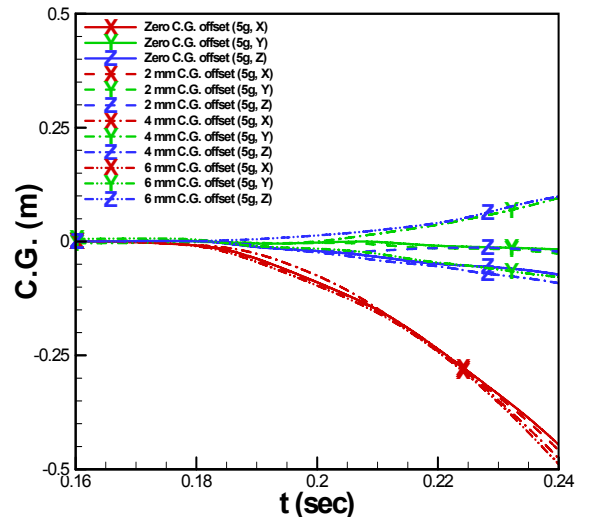


Fig. 7. 기본형상의 무게중심 변화에 따른 거리 거동 변화

타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 낙하시 보빈에 작용하는 항력에 비해 보빈의 무게가 매우 가벼워 낙하하지 못하고 중력과 반대 방향(-X)으로 상승하고 있음을 볼 수 있다. 또한, Fig. 8에서 보는 바와 같이 보빈이 낙하하면서 급격한 롤각( $\phi$ )과 피치각( $\alpha$ )의 방향 변화와 급격한 요우각( $\psi$ ) 변화를 볼 수 있는데 이는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 보빈 거동에 따른 보빈 표면에서의 비대칭인 비정상 압력분포가 보빈에 작용하고 보빈의 관성모멘트가 매우 작아 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 거동에 따른 자세변화는 흐름에

직접 노출되는 정압부(pressure side)와 흐름의 가속 등으로 인한 저압 영역인 부압부(suction side)의 불균형을 초래하며 동일한 방향으로의 거동을 증폭 시키는 역할을 하는 것을 볼 수 있으며, 매우 짧은 시간에 이러한 회전 거동이 발생되어 초기 거동임에도 불구하고 매우 급격한 회전 거동 특성을 보임을 알 수 있었다.

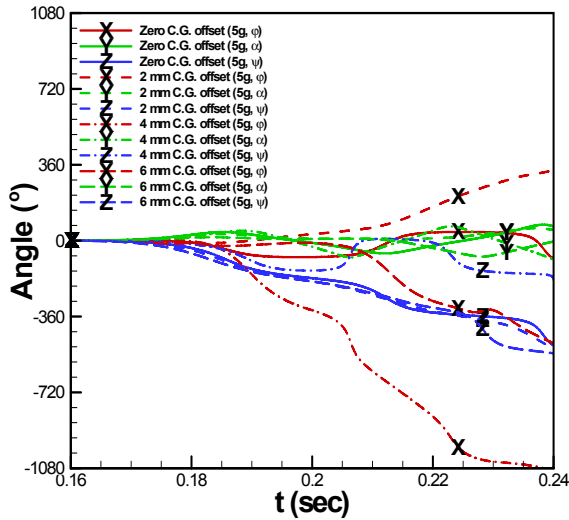


Fig. 8. 기본형상의 무게중심 변화에 따른 각거동 변화

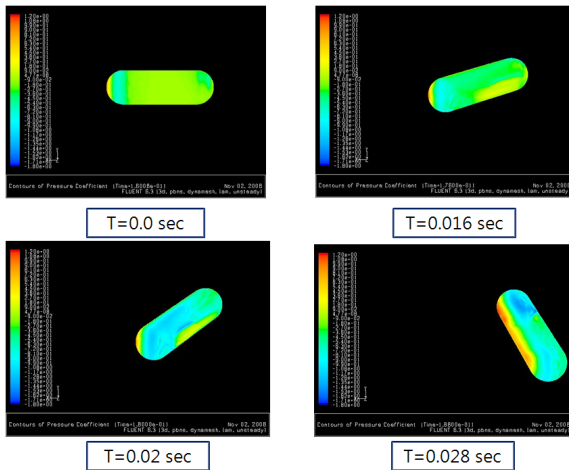


Fig. 9. 기본형상 낙하거동에 따른 표면압력 분포

무게중심 변화에 따른 보빈의 초기거동 특성을 파악하기 위하여 기본형상 및 0.5:1 회전타원체 보빈형상의 체적중심에 무게중심이 있는 경우와 무게중심을 횡 방향으로 반경의 약 1/4(2mm), 약 1/2(4mm) 그리고

약 3/4(6mm) 편심 준 경우에 대해 연구를 수행하였다. 무게중심 편심에 따른 수직 및 수평거동 변화와 각거동 변화를 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 10 그리고 Fig. 11에 나타내었다. 기본형상의 경우 횡 방향으로의 무게중심 변화에 따라 수평 거동 변화는 약간의 차이를 보이지만 수직 거동 변화는 매우 작게 발생됨을 볼 수 있다. 또한 횡 방향으로 편심으로 인하여 요우각 및 피치각의 거동 변화는 상대적으로 미미하지만 롤각 거동 변화는 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 현상은 횡방향 편심에 따른 관성모멘트가 롤방향의 거동에 영향을 주어 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 횡방향의 편심으로 인한 롤각 거동 변화는 보빈 반경의 1/2 정도 편심을 준 경우가 초기거동에 가장 큰 영향을 줄 수 있다. 0.5:1 회전타원체 보빈의 횡방향 편심에 따른 거동 변화는 Fig. 10과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 수직 및 수평 거동 변화는 상대적으로 미미하게 나타났다. 그러나 기본형상에서 본 바와 같이 요우각 및 피치각 거동 변화는 상대적으로 미미하지만 롤각 거동 변화가 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다. 기본형상과 비교시 반경의 3/4 정도 편심을 주는 경우가 롤각의 변화가 가장 크게 나타나지만 반경의 1/2에 편심을 주는 경우에 비해 그 차이가 크지 않으며 반경의 1/2의 편심을 주는 경우는 비교적 한 방향으로의 안정된 롤각 거동 변화를 보이지만 3/4 편심을 준 경우는 낙하 초기 거동시 급격한 롤 방향 변

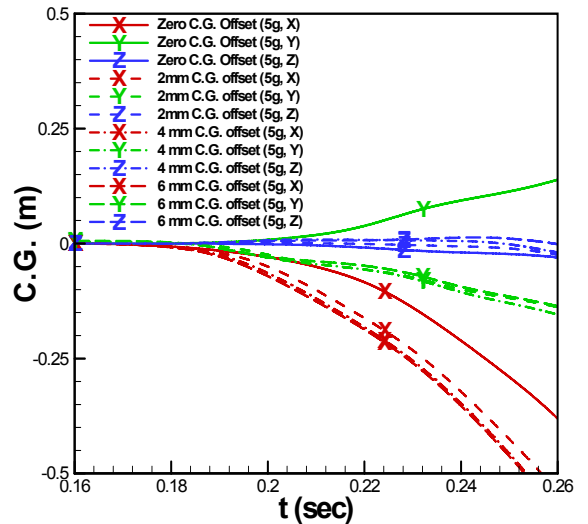


Fig. 10. 무게중심 변화에 따른 거리거동 변화(0.5:1 회전타원체 보빈형상)

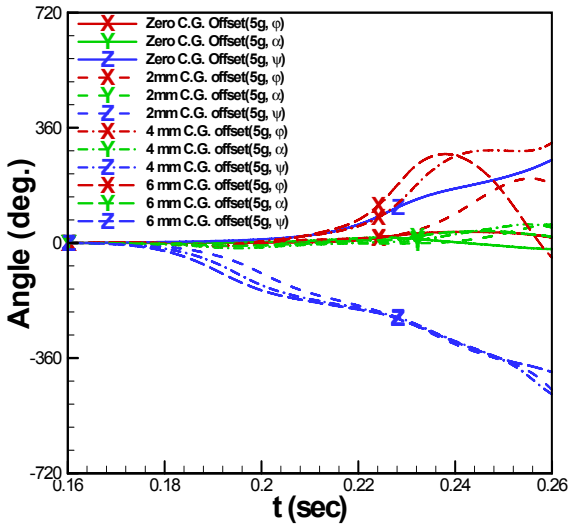


Fig. 11. 무게중심 변화에 따른 각거동 변화(0.5:1 회전 타원체 보빈형상)

화를 같이 유발함을 볼 수 있다. 위의 결과로부터 안정된 상태에서 최대의 롤각의 거동 변화를 얻기 위해서는 횡방향으로 반경의 1/2 정도 편심을 주는 것이 가장 효율적임을 확인 할 수 있었다.

보빈의 회전타원체 형상변화에 따른 낙하거동 변화를 Fig. 12와 13에 나타내었다. 하였다. 수직 및 수평 거동 변화는 그림에서 보는 바와 같이 기본형상의 경우는 수직 거동 변화가 수평 거동변화에 비해 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보이며 0.5:1 회전타원체 형상의 경우는 수평 및 수직 거동 변화 모두가 상대적으로 작게 나타나는 경향을 보였다. 이에 반해 2:1 회전타원체 형상의 경우는 횡방향으로의 거동 변화가 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 형상변화에 따른 각 변위는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 기본형상에 비해 0.5:1 회전타원체 보빈의 경우 각 거동 변화가 상대적으로 매우 작게 나타나지만, 2:1 회전타원체 보빈형상의 경우는 기본형상에 비해 상대적으로 롤각 및 요우각의 급격한 거동 특성을 보이는데 이는 상대적으로 길이가 길어 비정상 압력분포에 의한 영향을 상대적으로 많이 받아 이의 영향이 거동 특성에 나타난 것으로 판단된다. 상대적으로 길이가 짧은 0.5:1 보빈형상의 경우는 짧은 수두(head)가 비정상 흐름의 영향을 상대적으로 적게 받아 수직 및 수평 거동과 각 거동 변화가 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다.

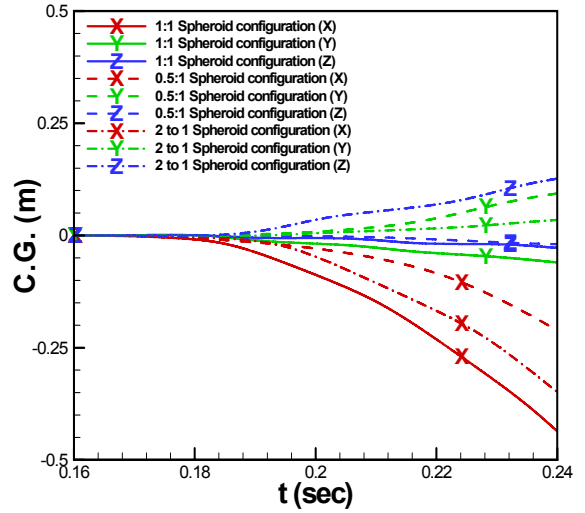


Fig. 12. 보빈 형상변화에 따른 수직 및 수평거동 변화

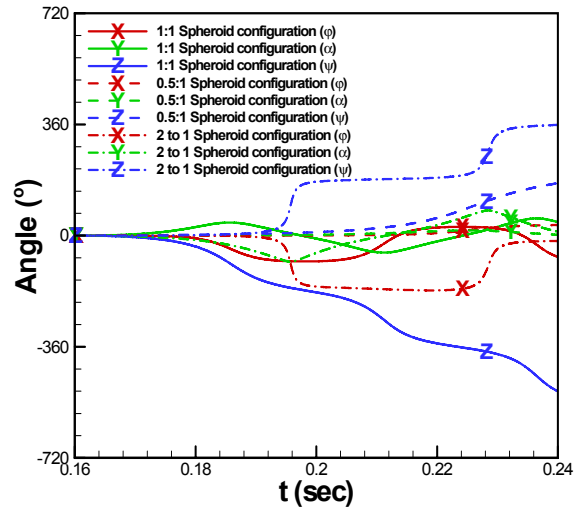


Fig. 13. 보빈 형상 변화에 의한 각거동 변화

라. 흐름각 변화에 따른 거동 특성

측풍에 따른 거동 변화를 파악하고자 동일한 속도의 경우에 대하여 흐름각 변화에 따른 보빈의 거동 특성을 연구하였다. 흐름각 변화에 대한 영향은 기본형상과 0.5:1 회전타원체 형상에 대해 계산을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 14 ~ Fig. 17에 나타내었다.

기본형상의 경우 Fig. 14에서 보는 바와 같이 흐름각 변화에 따른 측풍의 영향으로 흐름각 방향(Z)의 거동이 일정한 크기로 증가됨을 볼 수 있다. 흐름각 변화에 따른 각거동 변화는 Fig. 15에서 보는 바와 같이

상대적으로 아주 미미하지만 흐름각 15°의 경우는 물각과 요우각의 급격한 변화 경향을 보이는데 이는 초기 거동에는 큰 영향을 주지 않지만 전체 낙하거동 특성에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 0.5:1 회전타원체의 경우 흐름각 변화에 따른 거동 특성은 기본형상에 비해 상대적으로 민감하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 급격한 형상변화로 인하여 작은 흐름각 변화에도 상대적으로 큰 압력구배를 유발시켜 초기 거동에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

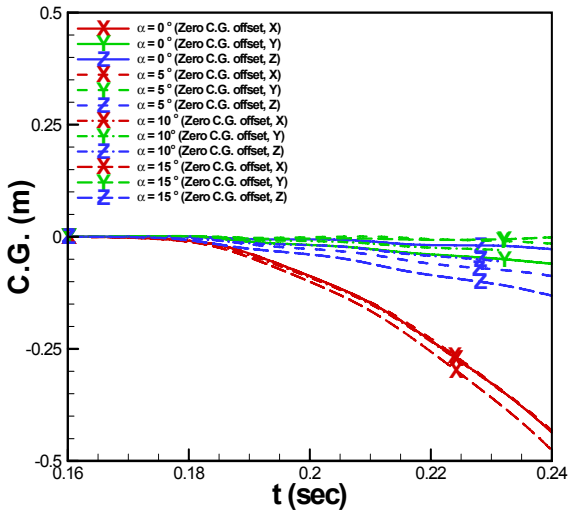


Fig. 14. 기본형상의 흐름각 변화에 따른 수직 및 수평 거동 변화

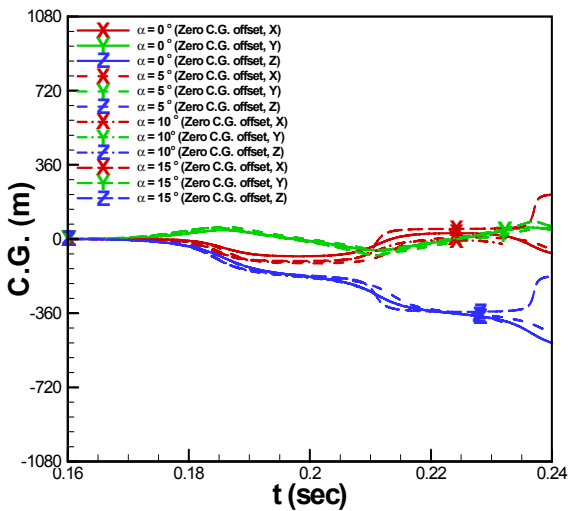


Fig. 15. 기본형상의 흐름각 변화에 따른 각거동 변화

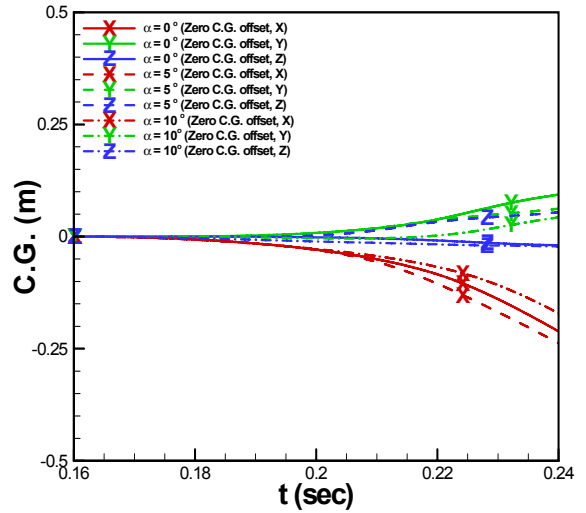


Fig. 16. 흐름각 변화에 따른 수직 및 수평거동 변화 (0.5:1 회전타원체 형상)

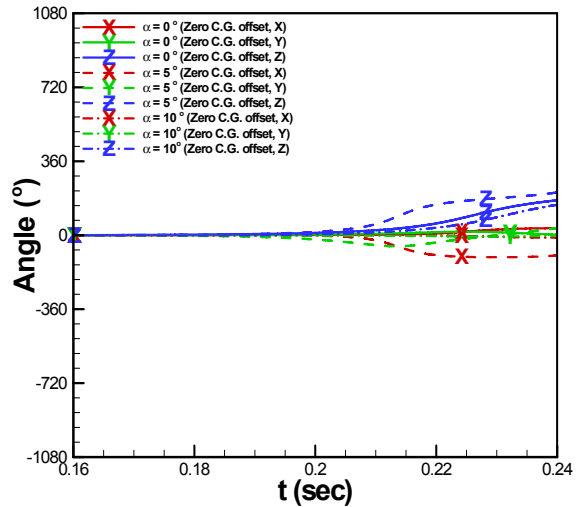


Fig. 17. 흐름각 변화에 따른 각거동 변화(0.5:1 회전타원체 형상)

## 5. 결론

탄소섬유자탄 회전타원체 보빈의 정밀한 유도 및 정확한 섬유 격자 형성 예측에 필요한 기본 공력특성을 파악하기 위해 비정상 공력해석 및 6-자유도 운동해석을 통한 초기 낙하 거동에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 수치적 연구를 통해 보빈 형상변화, 무게중

심 변화 및 흐름각 변화에 따른 낙하거동을 연구하였으며 사용된 수치적 기법 검증 및 레이놀즈 수 영향 등을 파악하고자 풍동시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 레이놀즈 수 변화에 따라 보빈 표면에는 박리버블의 생성 및 크기 변화가 발생하며 이로 인해 흐름 가속영역의 변화로 보빈 표면에서의 압력차가 발생된다. 이러한 표면에서의 압력변화는 레이놀즈 수 110,000~140,000 이상에서 수렴해 가는 경향을 보인다.
2. 보빈 전반부 형상의 길이가 짧은 경우는 회전 거동 변화가 상대적으로 작게 발생되며, 전반부의 형상의 길이를 길게 하는 경우 급격한 회전 거동 변화 특성을 보인다.
3. 보빈 전반부 길이가 짧은 0.5:1 회전타원체 형상의 경우 흐름각 영향을 상대적으로 크게 받지만 반구 보빈 형상의 경우 흐름각 변화에 대한 영향을 적게 받는다.

4. 보빈의 회전 거동은 무게중심 변화에 민감하게 나타나며 무게중심을 횡방향으로 반경의 1/2 정도 편심을 준 경우가 최대의 롤각 거동을 얻을 수 있었다.

## Reference

- [1] <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/dumb/blu-114.htm>
- [2] FLUENT 6.3 User's Guide
- [3] GAMBIT 2.4 User's Guide
- [4] Blich, J. A., "Notes on Half-Model Testing in Wind Tunnel", AGARD-Report-298, 2001.
- [5] Gatlin, G. M., Parker, P. A., and Owens, L. R., "Development of a Semi-Span Test Capability at the National Transonic Facility(invited)", AIAA-2001-0759, 2001.