

## 비행선 자세각에 따른 부력중심 이동 및 종적 정안정성

이윤교\*, 김동민\*\*, 이진우\*\*\*

### Pitch Effects on Center of Buoyancy and Longitudinal Static Stability of an Airship

Yung-Gyo Lee\*, Dong-Min Kim\*\*, Jin-Woo Lee\*\*\*

#### Abstract

Center of buoyancy moves along with pitch attitude variation, which causes Helium gas inclination. In this paper, movement of center of buoyancy and corresponding variation of longitudinal static stability were observed. The effect of separating wall, which is placed in the envelop to minimize movement of center of buoyancy was also investigated. Installation of separating wall was proved to be essential for current design, because movement of center of buoyancy aggravates longitudinal static stability. Investigation of longitudinal static stability for various speeds reveals a 50m airship is statically stable only in a low speed regime.

#### 초 록

비행선의 자세각 변화는 내부의 헬륨 가스의 쏠림에 의한 부력중심 이동을 수반하게 된다. 본 논문에서는 자세각에 따른 부력중심 이동거리를 산출하고, 그에 따른 종적 정안정성을 고찰하였다. 또한, 부력중심 이동 거리를 줄이기 위하여 비행선 내부에 설치된 격막에 의한 효과를 검토하였다. 부력중심은 종적 정안정성을 저하시키는 방향으로 이동하므로, 현 설계에서는 격막의 설치가 필수적이다. 속도에 대한 종적 정안정성을 고찰한 결과, 현 설계에서는 매우 낮은 속도 영역에서 정적으로 안정함을 알 수 있다.

키워드 : 비행선(airship), 부력(buoyancy), 자세각(pitch), 종적 정안정성(longitudinal static stability)

\* 비행선그룹/lyg@kari.re.kr

\*\* 비행선그룹/dmkim@kari.re.kr

\*\*\* 비행선그룹/jin@kari.re.kr

## 1. 서 론

한국 항공우주연구원에서는, 성층권에서 장기 체공하며 부여된 임무 수행을 목표로 하는 다목적 성층권 비행선의 개발을 수행하고 있으며, 이의 기술입증용 시제기인 50m급 축소형 비행선의 기본설계를 완료하였다. 축소형 비행선은 고도 5km까지 상승하기 위하여, 지상에서는 기낭 전체부피의 60%만을 헬륨으로 채우고, 나머지 공간은 공기낭으로 형상을 유지하게 된다. 비행선이 상승함에 따라 헬륨이 팽창하고 공기낭의 밸브를 통하여 공기가 빠져 나가게 되어, 결국 압력고도인 5km에서 비행선의 기낭은 헬륨만으로 가득차게 된다. 또한, 비행선 내부의 전방 및 후방에 위치한 공기낭의 상대적인 부피를 인위적으로 조절함으로써, 부력중심을 이동시켜, 비행선의 자세각을 조절하는데 사용하기도 한다.

일반적으로 비행선은 정적으로 매우 불안정한 형상을 가지고 있으며, 이는 비행선의 트림특성을 저하시키는 요인이 되고 있다. 한편, 부력을 얻기 위하여 기낭내부의 헬륨낭에 채우게 되는 헬륨은, 기낭내부의 공기낭에 들어 있는 공기와의 밀도차 때문에 비행선의 자세각에 따라 움직이게 되고, 이로 인하여 부력중심의 위치와 피칭 모멘트가 변하게 된다. 부력은 비행선의 속도에 관계없지만, 공기력에 의한 모멘트에 비하여 무시할 수 없는 크기의 모멘트를 발생시키므로, 비행선의 중적 정안정성을 논하기 위해서는, 부력에 의한 모멘트를 함께 고려하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는, 설계된 50m급 축소형 비행선의 풍동시험결과를 제시하고, 아울러 피치 자세각에 따른 헬륨의 부력중심 위치를 도식적인 방법으로 구하여, 부력에 의한 피칭 모멘트를 계산하였다. 계산된 결과는 피치 자세각이 비행선의 중적 정안정성에 미치는 영향을 고찰하는데 사용되었다. 아울러, 중적 정안정성을 향상시키기 위하여 고안된 헬륨낭의 격막에 의한 효과를 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 피칭모멘트 평형 방정식

그림 1에는, 현재 한국항공우주연구원에서 개발 중인 50m급 축소형 비행선의 개략적인 제원과 내부 기낭구조를 도시하였다. 비행선의 내부는 2개의 격막, 3개의 헬륨낭 및 3개의 공기낭으로 이루어져 있다.

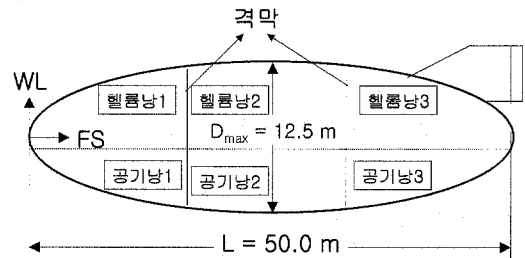


그림 1. KARI 비행선의 제원 및 내부구조

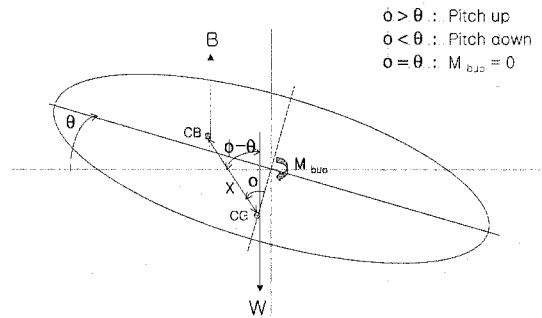


그림 2. 부력에 의한 비행선의 피칭모멘트

비행선의 중적 정안정성을 고찰하기 위하여, 수평 정상비행( $\alpha=0$ )에 대한 피칭 모멘트 평형 방정식을 쓰면 다음과 같다. 수식 (1)은 공기력에 의한 모멘트( $C_{M \text{ aero}}$ )와 부력에 의한 모멘트( $C_{M \text{ buo}}$ )를 모두 포함한다. 그림 2에는 참고로, 부력에 의한 비행선의 피칭모멘트를 도시하였다.

$$M = C_{M \text{ aero}} qSc + BX \sin(\phi - \theta) \quad (1)$$

양변을  $qSc$ 로 나누면,

$$C_M = C_{M\text{aero}} + \frac{BX}{qSc} \sin(\phi - \theta) \quad (2)$$

$$= C_{M\text{aero}} + C_{M\text{buo}}$$

윗 식에서 보듯이 비행선의 피칭 모멘트를 결정짓는 중요한 요소는 공력 특성과 더불어, 부력중심과 무게중심의 상대적인 위치(X)와 각도( $\theta$ )이며, 이는 비행선의 자세각과 밀접한 관계가 있다.

식 (2)를  $\theta$ 에 대하여 미분하면,

$$C_{M\theta} = C_{M\text{aero}\theta} - \frac{BX}{qSc} \cos(\phi - \theta) \quad (3)$$

이 되고,  $C_{M\theta} < 0$  일 경우 정적으로 안정하다.

## 2.2 정지 비행시의 정적 종안정성

그림 2에 도시하였듯이, 정지비행(호버링)시의 피칭 모멘트와 평형 자세각은 부력과 무게중심의 상대적인 위치에 의하여 결정된다. 무게중심 위치는 변하지 않는다는 가정하에, 부력중심 이동에 따른 모멘트를 계산하고, 아울러 모멘트 평형 자세각에 미치는 영향을 살펴 보았다.

### 2.2.1 자세각에 따른 부력중심 위치이동

앞에서도 언급하였듯이, 비행선이 기울어지게 되면, 상대적으로 가벼운 헬륨이 공기보다 위로 이동하게 되므로, 헬륨의 부피중심으로 가정한 부력중심 또한 이동하게 된다. 본 절에서는  $-30^\circ \sim 30^\circ$ 의 자세각에 대한 부력중심의 위치를 도식적인 방법으로 구하였다. 헬륨의 분포와 부력중심을 표시한 그림 3에서 보여 주듯이, 피치업 상태에서는 부력중심이 비행선 동체축(Fuselage Station)의 전방으로 이동하고, 피치다운 상태에서는 후방으로 이동함을 알 수 있다. 즉, 비행선의 자세각에 따라 부력중심은 정적 종안정성을 저하시키는 방향으로 움직이게 된다.

### 2.2.2 격막설치 효과

비행선의 자세각 변화는 부력에 의한 복원력이 감소하는 방향으로 부력중심을 움직이게 되며, 이는 비행선의 정안정성을 감소시키게 된다. 그림4에는 부력중심 이동궤적을 비행선의 축방향(FS)과 수직방향(WL)으로 나타내었으며, 그림5에는 부력중심과 무게중심의 거리(X) 변화를 도시하였다.

격막이 있을 경우에는 격막이 없을 경우 보

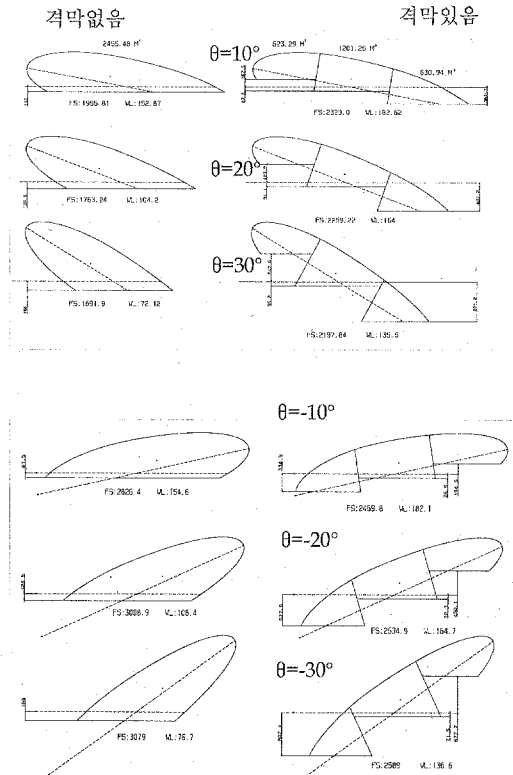


그림 3. 부력중심 이동거리 계산결과

다 부력중심 이동이 매우 적음을 알 수 있다. 식 (2)에서 볼 수 있듯이, 모멘트의 크기는 부력중심과 무게중심의 거리(X)에 비례하나, 정안정성에 중요한 모멘트의 방향은 그림 1의  $\phi$ 에 의하여 결정된다.

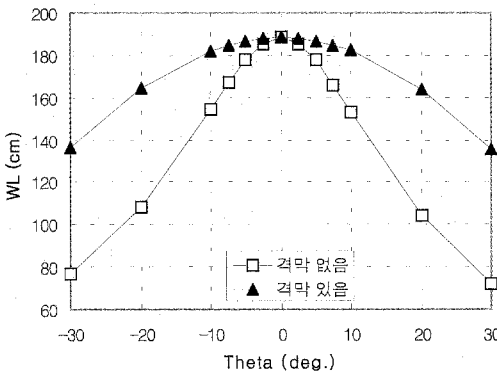
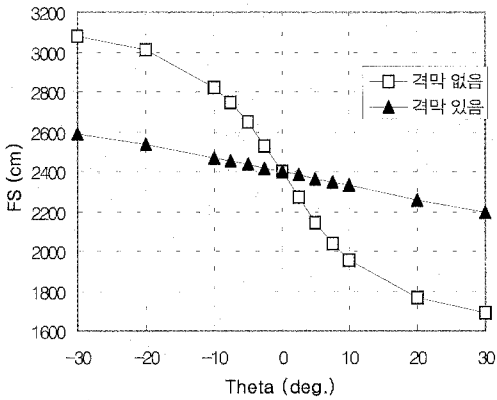


그림 4. 자세각에 따른 부력중심 위치 변화 (FS 및 WL)

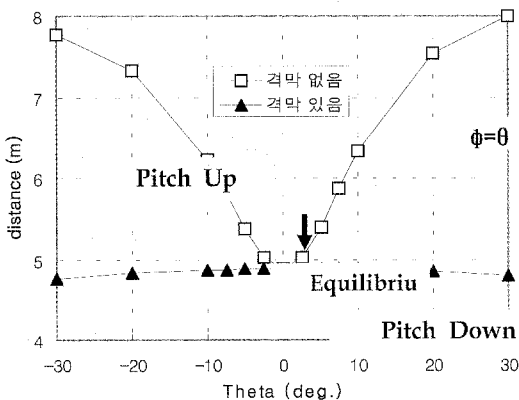


그림 5. 부력중심과 무게중심 사이의 거리 변화

그림 6을 살펴보면,  $\phi$ 가 피치 자세각( $\theta$ )에 의하여 유일하게 결정됨을 알 수 있고, 그 기울기가 정안정성 및 복원력을 결정짓는 척도가 됨을 알 수 있다. 따라서,  $\phi$ 와  $\theta$ 의 관계가 정안정성 및 자세 복원력에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

①  $\phi = \theta$ 인 경우

이는 비행선의 자세각이 변하더라도 헬륨의 이동이 없고, 따라서 부력중심의 이동이 없는 경우를 가정한 것으로, 실제 비행에서는 존재하기 힘든 경우이다.

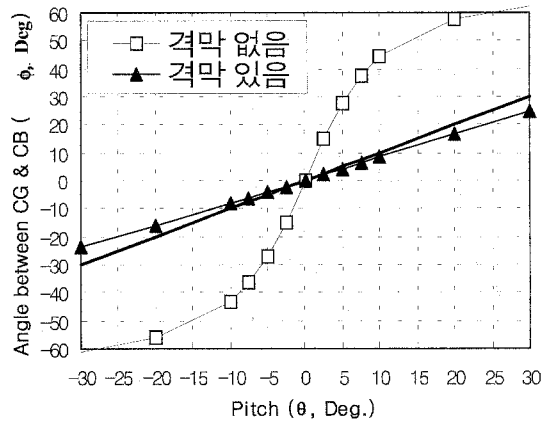


그림 6. 자세각에 따른  $\phi$  및 모멘트 평형 자세각 (속도=0, CG위치 : FS 2400)

정지 비행할 경우, 공기역학적인 모멘트는 없으므로, 부력에 의한 모멘트만이 존재하게 된다. 즉,

$$M = BX \sin(\phi - \theta) \quad (4)$$

정안정성 조건  $M_\theta < 0$  를 만족하기 위하여,  $\cos(\phi - \theta) > 0$ ,  $\therefore -\frac{\pi}{2} + \phi < \theta < \frac{\pi}{2} + \phi$

$$(5)$$

이 되어야 한다. 즉, 모멘트 평형상태인  $\theta = \phi$ 일 때 가장 안정하며, 이 때의 자세각에서  $\pm 90^\circ$  사이에서 정적으로 안정하다. 그러나, 외

력이 없을 경우 모든 자세각에서  $\theta = \phi$ 로의 복원력이 존재한다.

②  $\phi$ 가 자세각에 따라 변하는 경우 ( $\phi = k\theta$ )

본 절에서는 자세각이 변함에 따라 부력중심이 이동하는 경우를 고려한다. 그림 6에서 나타난 대로  $\phi$ 는 자세각에 대한 일차함수로 표현할 수 있다. 이러한 경우, 일정한 X에 대하여, 정안정성 확보 조건과 자세복원력의 존재 조건은 대부분의 비행영역인  $|\sin(\phi - \theta)| < 90^\circ$ 에서 일치하게 된다. 한편, 본 논의를 실제 비행가능 영역인  $|\phi| < 90^\circ$ 와  $|\theta| < 90^\circ$ 의 조건으로 한정하면,  $\phi = k\theta$ 인 경우,

$$|\theta| < \frac{\pi}{2|k|}, \quad |\phi| < \frac{\pi}{2}|k| \quad (5)$$

로 바꾸어 표현할 수 있다.

$\phi = k\theta$ 일 경우 식 (3)과 (4)는 다음과 같이 된다.

$$M = BX \sin[(k-1)\theta] \quad (6)$$

$$M_\theta = (k-1) BX \cos[(k-1)\theta]$$

(7)

$k = 1$ 인 경우, 즉  $\phi = \theta$ 일 때 정안정성은 중립이고, 복원력은 항상 존재하지 않으며, 모든 자세각이 평형 자세각이다.

$k < 1$ 인 경우,

$$M_\theta < 0 \quad \text{for} \quad |\theta| < \frac{\pi}{2|k-1|} \quad (8)$$

다시 말하면,  $|\phi| < 90^\circ$ 와  $|\theta| < 90^\circ$ 에서 정적으로 안정하고 모멘트 평형 자세로의 복원력을 가진다.

또한,  $k > 1$ 인 경우,

$$M_\theta > 0 \quad \text{for} \quad |\theta| < \frac{\pi}{2(k-1)} \quad (9)$$

즉,  $|\phi| < 90^\circ$ 와  $|\theta| < 90^\circ$ 에서 정적으로 불안정하고 평형자세로의 복원력 또한 갖지 못하여 약간의 외력에도 비행선이 뒤집히는 등의 현상을 가져오게 된다.

그림 6에는 격막이 있을 경우와 없을 경우의

$\phi$ 를 자세각의 함수로 나타내었다. 격막이 있을 경우, 정적으로 안정하며, 평형자세각  $\theta=0^\circ$ 로의 복원력을 가진다. 반면에, 격막이 없을 경우는 자세각에 따른 부력중심의 이동이 매우 심하여 ( $k \gg 1$ ) 정적으로 불안정하며, 평형 자세각  $\theta=0^\circ$ 를 유지하더라도 외부교란이 있을 경우, 급격히 피치업 되거나 피치다운하게 된다. 따라서, 정지비행시 자세각을 안정되게 유지하기 위하여 격막의 설치가 필수적임을 알 수 있다.

### 2.2.3 무게중심 위치에 따른 평형 자세각

정지 비행시의 모멘트 평형 자세각은 그림 2에서 도시하였듯이  $\phi=\theta$ 일 때의 자세각이다. 무게중심의 위치에 따라  $\phi$ 는  $\theta$ 축을 따라 평행이동하게 되고, 그에 따라 평형 자세각이 결정된다. 그림 7에 제시한 도표는,  $\phi=0.89$ 인 KARI 비행선의 경우, 약 50cm의 무게중심 이동이 약 27도의 평형 자세각 변화를 유발한다는 것을 보여 주고 있다.  $\phi = k\theta$ 일 때 기울기  $k$ 가 1.0에 가까울수록 평형 자세각은 무게중심 위치에 민감해 지며, 이는 자세 변화와 부력중심 이동 현상이 상호 반복되기 때문에 일어나는 현상이다. 따라서, 정지비행시의 평형 자세각을 0도 근처로 유지하려면, 설계시 부력중심과 무게중심의 비행선 축방향 좌표(FS)를 일치하도록 하거나, 부력중심을 임의로 조절할 수 있는 별도의 장치가 필요하다.

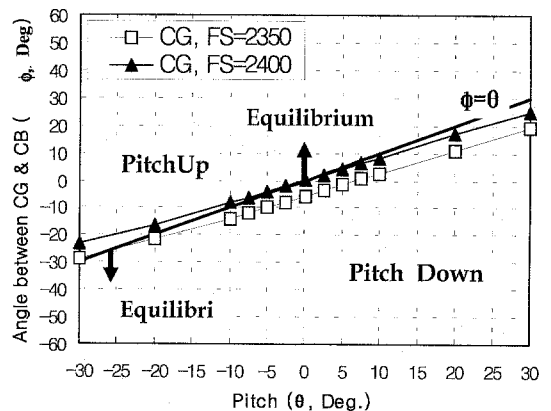


그림 7. 자세각에 따른  $\phi$  및 평형 자세각(격막있음)

### 2.3 비행속도에 따른 정적 종안정성

지금까지 살펴 본 비행속도가 없는 경우에 비하여, 비행속도가 있을 경우에는 공기역학적인 모멘트( $M_{aero}$ )가 비행선의 종적 정안정성에 중요한 역할을 하게 된다.

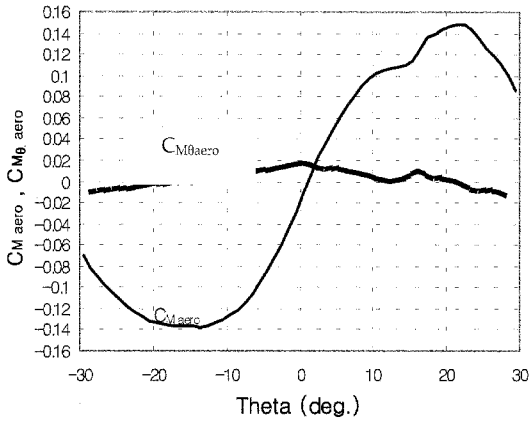


그림 8. 공기력에 의한 피칭모멘트

우선, 자세각에 따른 공기역학적인 모멘트를 그림 8에 나타내었다. 일반적으로 꼬리날개를 포함한 비행선 형상은 대부분의 비행영역( $-20^\circ < \theta < 20^\circ$ )에서 정적으로 불안정함( $C_{M\theta} > 0$ )이 잘 알려져 있다. 매우 큰 자세각에서 정적 종안정성을 확보하는 경향을 보이나, 이 영역은 거의 비행하지 않는 영역이므로 큰 의미가 없다.

그림 9에는 공기력에 의한 모멘트와 부력에 의한 회복력(격막이 있는 경우)을 모두 고려한  $C_{M\theta}$ 를 도시하였다. 식 (1)에서 보듯이  $C_{M_{buo}}$ 는 속도의 함수 이므로, 그림 9에는 속도축에 대하여 나타내었으며,  $\theta$ 에 대한 경향은 별도의 그래프들로 표현하였다. 그림에서 보듯이 속도가 커질수록  $C_{M_{aero}}$ 의 영향이 지배적으로 되므로  $\theta$ 에 관계없이 정적으로 불안정한 값을 갖는다. 그러나, 낮은 속도에서는  $C_{M_{buo}}$ 의 영향이 지배적이므로, 격막이 있는 현 설계에서는 정적으로 매우 안정한 경향을 나타내었다.

$\theta$ 에 대한 경향은  $C_{M_{aero}}$ 와 매우 유사하다.

유의할 점은, 매우 낮은 속도에서 정적으로 안정하더라도 조종에 의한 비행이 모두 가능한 것은 아니며, 또한, 정적으로 불안정하더라도 동안정성을 확보하면 비행이 가능함이 알려져 있다[1].

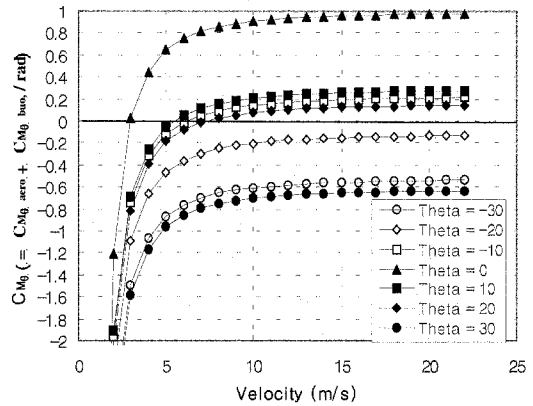


그림 9. 속도에 따른 비행선의 종적 정안정성

## 3. 결 론

비행선의 자세각에 따른 부력중심 위치 이동을 계산하고, 그에 따른 정적 종안정성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 비행선은 공기역학적으로 대부분의 비행영역에서 정적으로 불안정하나, 부력에 의한 복원 모멘트가 종적 정안정성을 향상시킨다.
- 비행선의 자세각에 따라 부력중심은 복원 모멘트를 감소시키는 방향으로 이동한다. 따라서, 종적 정안정성 확보를 위하여 부력중심의 움직임을 최소화하는 것이 필요하다.
- 자세각에 따른 부력중심의 이동을 최소화시키기 위하여 격막의 설치가 필요하다. 공기량을 고정시킬 수 있는 케이블을 장착하거나, 강제로 부력중심을 이동시킬 수 있는 기능이 이를 대신할 수도 있을 것이다.

- 정지비행시 비행선의 자세를 수평으로 유지하기 위하여, 설계 및 제작시 부력중심과 무게중심의 동체축 방향 거리를 일치시키는 것이 중요하다. 이 거리가 조금만 어긋나게 되어도 부력중심 이동현상과 맞물려 평형 자세각이 매우 커지게 되기 때문이다.

## 참 고 문 헌

1. DeLaurier, J. and Shenck, "Airship Dyanmic Stability," AIAA Paper 79-1591,1979.
2. Khoury, G.A. and Gillet, J.D., Airship Technology, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.