

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(5), 359-366(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.5.359

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 가오리연 공력 특성과 방줄의 모핑 해석

강치행\*, 석진영\*\*

An Aerodynamic Characteristics and Morphing Analysis  
of Bridle Line for The Gaori Kite

Chi-Hang Kang\* and Jin-Young Suk\*\*

Dbrain\*, Chungnam National University\*\*

## ABSTRACT

In this paper, aerodynamic data of the Gaori kite was constructed through the wind tunnel experiment taking into consideration all the angles of attack formed during the flight of the Gaori kite. From this aerodynamic data, we made a morphing analysis of the relative length of the front bridle to the rear bridle required to achieve equilibrium flight as the angle of attack of the Gaori kite or the azimuth angle change. As a result, it was found that the relative length of the front bridle to the rear bridle depends entirely on the chord length of the kite, the relative wind speed and changes morphed according to the angle of attack. Using this information data, one can adjust the relative length of the bridle line to suit the kite attitudes and flight environments handling the kites that maintain optimal flight performance.

## 초 록

본 논문에서는 가오리 연의 비행 중에 형성되는 모든 받음각 변화를 고려한 풍동 실험을 통해 가오리연의 공력 자료를 구축하였다. 이 공력 자료로부터 가오리연이 받음각 또는 연실-지평각이 변함에 따라 평형 비행 상태를 이루는데 필요한 목줄에 대한 풍수줄의 상대적 길이를 해석하였다. 해석 결과 목줄에 대한 풍수줄의 상대적 길이는 연의 시위 길이와 풍속에 전적으로 의존하고 받음각에 따라 모핑 변화하고 있음을 알 수 있었다. 본 자료를 활용하면 비행환경과 연의 자세에 맞게 방줄의 상대길이를 조정할 수 있으며 최적 성능을 유지하는 연을 다룰 수 있게 될 것이다.

**Key Words** : Gaori Kite(가오리연), Wind Tunnel Experiment(풍동실험), Aerodynamic Data(공력자료), Bridle Line(방줄), Morphing Analysis(모핑 해석), Flight Environments(비행환경)

## 1. 서 론

연에 관한 국내 학술 논문중 방패연의 설계 요소 변경에 따른 기능을 공학적으로 분석한 연

구는 주로 Kang[1~6]에 의해 이루어졌다. Kang은 풍동실험을 통하여 방패연이 비행하는 실제 받음각 구간에서 공력 자료를 구축[1]하였으며 이러한 공력 자료를 바탕으로 연의 평형 비행상

† Received : December 26, 2016

Revised : April 25, 2017

Accepted : April 26, 2017

\* Corresponding author, E-mail : chkang04@daum.net

태를 만족하는 방줄의 상대적 길이에 대한 해석을 통해 우리 조상들의 전통적 방줄매기 방법의 근원을 찾아내었다[2]. 또한 Kang은 유체흐름의 가시화를 통하여 방구멍은 경계층 분리를 제어하는 날개 고양력 장치의 슬롯 시스템과 유사한 기능이 있음을 밝힘으로서 우리 조상들이 서양의 비행기 발명 훨씬 이전부터 고양력장치의 원리를 이해하여 연의 비행 성능 개선에 효과적으로 적용하여 왔다는 것을 증명하였다[3-6].

가오리연에 관한 국내 연구로는 Sah[7]의 연구가 있는데 유속 3m/sec에서 받음각이 0도에서 45도 사이의 공력계수를 수치해석을 통해 구하고 이를 연의 비행자세 해석에 응용하여 최소요구 풍속에 대응하는 방줄의 매듭을 제안하였다.

연을 날리는 과정은 지면에 직각으로 이륙하여 머리 바로 위까지 올라가면 거의 연은 수평자세가 되며 연의 받음각은 90도에서부터 출발하여 0도까지 바뀌게 된다[8]. 그러므로 본 논문에서는 가오리연 모형에 대해 0도에서 90도까지 5도 간격으로 받음각을 변화하면서 풍동실험을 통해 공력을 측정하고 무차원화 하여 데이터베이스를 구축하였다. 또한 가오리연의 평형 비행 해석을 통해 비행환경과 원하는 비행자세에서 연이 최적 비행성능을 유지하도록 방줄의 상대적 길이를 결정할 수 있는 자료를 제시하였다.

일반적으로 가오리연에는 꼬리를 달고 띄운다. 그러나 좌우 대칭을 정확하게 제작한 가오리연은 꼬리가 없어도 잘 뜬다. 인도나 홍콩의 싸움연들은 마름모꼴인 가오리연과 비슷한 형태이나 꼬리가 없다. 꼬리가 없어도 잘 뜨고 안정적으로 기동할 수 있으려면 연을 잘 만들고 잘 날리는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 꼬리가 없는 가오리연에 대한 공력 해석과 방줄의 모핑 변화를 논하였다.

## II. 본 론

### 2.1 실험환경 및 조건

풍동실험의 공력측정 장치인 외부 밸런스는 풍동실험 모델에 작용하는 공기역학적인 힘과 모멘트를 측정하는 매우 중요한 장비로서 공군사관학교 항공우주공학과 실험실이 보유하고 있는 소형 아음속 풍동에는 Aerolab의 pyramidal strain balance가 있다[9]. 측정을 요하는 6분력 값의 정확도를 높이기 위해서 측정 범위에 대한 밸런스의 선 보정 작업을 수행하였다.

풍동의 측정부는 0.9m x 0.9m x 2.15m이므로

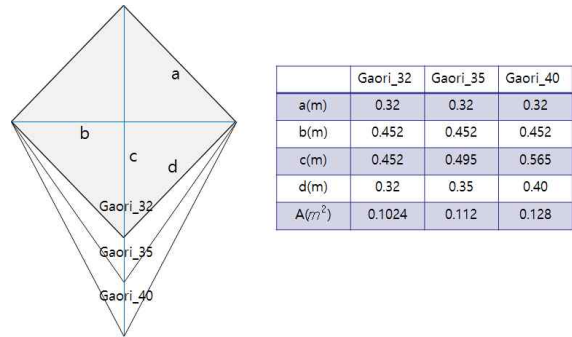


Fig. 1. Model Shape and Dimension

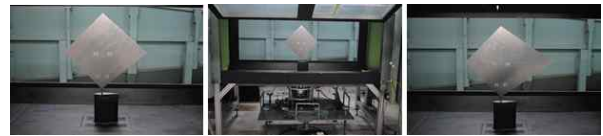


Fig. 2. Wind Tunnel Experiment

blockage effect를 고려하여 Fig. 1과 같이 세 개의 가오리연 실험 모형을 제작하였다. 실험 모델의 장착은 Fig. 2의 사진에서 보는 것처럼 밸런스의 스트러트에 T자형 지그를 결합하여 가오리연 모델의 b선을 기준으로 장착하였다. 밸런스의 yaw각은 360°회전이 가능하므로 실험에서 요구하는 높은 받음각인 90°까지 힘과 모멘트를 측정할 수 있다. 또한 밸런스에서 측정되는 모멘트 성분들의 값들은 장착한 높이에 대해서만 보정하면 된다.

이렇게 모델을 설치할 경우 바람축에 대한 밸런스의 힘과 모멘트 성분은 lift는 side force로, side force는 lift로, yawing moment는 pitching moment로 각각 측정된다. 스트러트는 공기흐름속에서 노출되는 부분을 최소로 하고 노출에 따른 간섭항력을 줄이기 위해 fairing을 부착하였다. 모델을 장착했을 때 리졸빙 센터의 위치는 0.547m로 피라미달 밸런스의 보정 리졸빙 센터와는 0.22315m 오차가 있으므로 피칭모멘트를 계산할 때 이에 대한 보정을 수행하였다.

실험 조건은 공력 값을 명확하게 얻기 위하여 풍속을 10m/sec로 하였고 측정부 도어를 개방함으로써 대기조건을 충족시켰다. 밸런스로부터 측정 자료의 입출력은 LabVIEW 프로그램의 모니터를 통해 확인할 수 있으며 실험 환경의 물리적인 조건 (각도, 위치, 온도, 풍속)과 함께 측정된 공력자료는 실시간으로 엑셀 파일에 저장하였다.

### 2.2 공력측정 결과

Figure 3은 풍동 실험 조건에서 받음각을 5도씩 변화시키면서 측정한 양력계수 곡선을 보여주

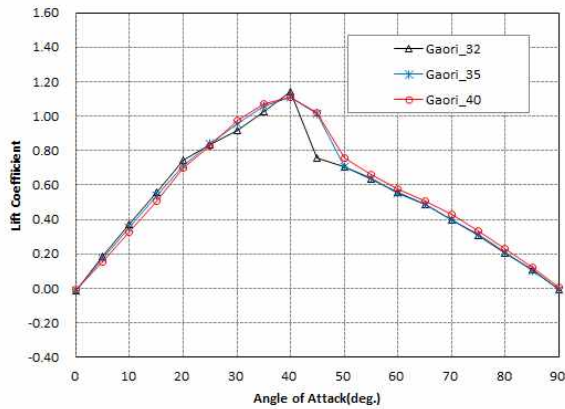


Fig. 3. Lift curve

고 있다. 최대양력계수는  $\alpha = 40^\circ$  에서  $C_{L_{max}} = 1.11 \sim 1.14$ 의 값을 갖는다. 상하 및 좌우가 대칭형인 Gaori\_32의 경우는  $\alpha = 45^\circ$  에서  $C_L = 0.755$ 로 최대양력계수와와의 차이가 0.387이다. 그러나 시위선이 다소 길어진 Gaori\_35와 Gaori\_40에서는 최대양력계수와와의 차이가 0.1이다. 그리고 시위선이 길어질수록 실속현상이 뚜렷하게 나타나지 않고 실속 이후 완만한 곡선형태를 이루고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 실속현상의 차이는 가로세로비가 작은 날개에서 시위선이 연장되면 실속이 완만하게 나타나는 현상과 일치한다[5]. 최대 양력 이후 실속 현상은  $\alpha = 50^\circ$  까지는 시위선이 길어질수록 완만한 곡선을 나타내다가  $\alpha = 50^\circ$  이후에는 세 모델 모두  $\alpha = 90^\circ$  까지 점진적인 양력 감소 경향을 보이고 있다.

Figure 4는 받음각 변화에 따른 세 모델의 항력계수 곡선을 보여주고 있다. 최대항력계수는  $\alpha = 90^\circ$  에서  $C_{D_{max}} = 1.23 \sim 1.28$ 의 값을 갖는다. 대칭형인 Gaori\_32의 경우는  $\alpha = 0^\circ \sim 40^\circ$  까지 꾸준히 항력이 증가하여  $C_D = 0.919$ 에 이르고 난 다음  $\alpha = 45^\circ$  에서  $C_D = 0.728$ 로 0.191 차이가 난다. 그러나 시위선이 다소 길어진 Gaori\_35와 Gaori\_40에서는 이러한 현상이 발생하지 않다가  $\alpha = 50^\circ$  에서 0.164만큼 떨어진 값을 보여준다. 이 받음각 영역은 실속 구간으로 Fig. 3의 양력 곡선에서도 요란이 발생한 구간이다. 그러므로 실속이 일어남으로 인해 양력과 항력에 요란이 발생하였음을 알 수 있다. 방패연의 공력 특성은 실속구간이 분명하게 나타나지 않고 이러한 요란이 거의 없는 완만한 항력 변화를 보이는데 이는 방구멍이 이러한 실속 현상을 방지하는 역할을 하기 때문이라는 것을 Kang[3]의 논문에서

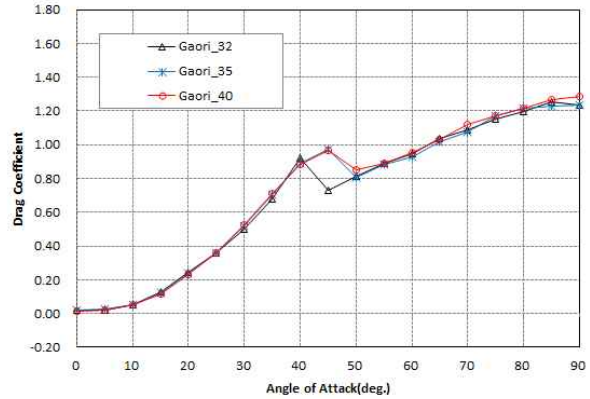


Fig. 4. Drag curve

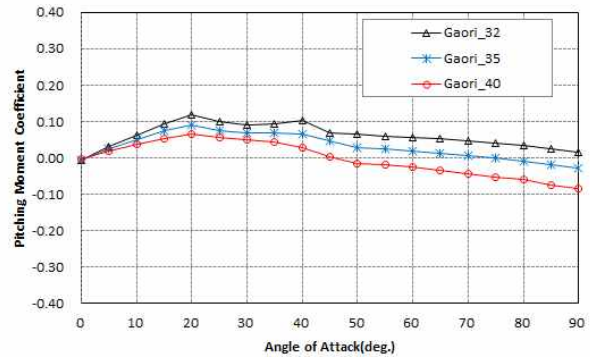


Fig. 5. Pitching moment curve

밝히고 있다.  $\alpha = 50^\circ$  이후의 받음각에서는 세 모델 모두  $\alpha = 90^\circ$  까지 점진적으로 항력이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

Figure 5는 받음각 변화에 따른 모델 장착점에 대한 피칭 모멘트 계수의 변화를 보여주고 있다. 모델 장착점(mounting trunnion point, tr)에 대한 피칭 모멘트 계수  $C_{M_{tr}}$  은 상하 및 좌우가 대칭인 Gaori\_32인 경우에 최대 0.12에서 최소 0.01의 값을 가지고 있으며 거의 일정한 대칭 분포를 보이고 있다. 모델의 시위가 길어지면 장착점에 대해 모델 형상은 상하가 비대칭이 된다. 장착선을 기준으로 위 면적보다 아래면적이 크기 때문에 받음각이 커질수록 부의 피칭모멘트 값을 가지며, 이러한 부의 피칭모멘트는 꼬리가 길어질수록 피칭안정성이 강화된다는 것을 보여주고 있다.

압력 중심(center of pressure, CP)에서는 공기력에 의한 모멘트가 0이라는 관계식을 이용하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다 [10].

$$x_{tr} - x_{CP} = \frac{C_{M_{tr}} c}{C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha} \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 모델의 시위선 길이이며,  $x_{CP}$ 는 앞전에서부터 압력 중심까지의 거리,  $x_{tr}$ 은 앞전에서부터 모델 장착 점까지 거리이다.

### 2.3 평형 비행 해석

가오리연은 좌우 대칭이기 때문에 Fig. 6처럼 2차원 자유물체도와 기하를 표현할 수 있다.

연에는 공기력의 합력인  $R$ , 연의 무게  $W$ , 연실의 장력  $T$ 가 작용한다. 이 세 힘 벡터가 평형을 이루려면 세 힘의 작용선이 동일점에 모여야 한다. 연이 질량(mass)이 없는 물체라면 연실의 장력  $T$ 를 연장한 점선은 공기력의 합력인  $R$ 이 작용하는 점인 압력 중심점을 지나야 하지만, 연은 질량을 가지고 있고 연실의 무게도 고려해야 하기 때문에 장력  $T$ 와 무게  $W$ 의 연장선의 교차점은 압력 중심점에서 벗어난 곳에 위치한다[2].

이러한 연의 평형 비행 상태를 이루는 조건을 결정하기 위해서는 반드시 공기역학적인 힘의 크기와 합력의 작용점인 압력 중심의 위치를 알아야 하는데 이는 (1)식으로부터 계산할 수 있다. 그런데 연의 시위선과 상대풍이 만나는 각인 받음각  $\alpha$ 에 따라 연에 작용하는 공기력의 크기가 달라지기 때문에 합력 작용점인 압력 중심의 위치도 변경된다.

장력  $T$ 가 작용하는 연실과 지평선이 이루는 각인 연실-지평각(azimuth angle)  $\theta$ 는 힘의 평형 식으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{L - W}{D}\right) \quad (2)$$

그리고 연실의 장력은 힘 벡터 관계에 의해 다음과 같은 식이 성립한다.

$$T = \sqrt{(L - W)^2 + D^2} \quad (3)$$

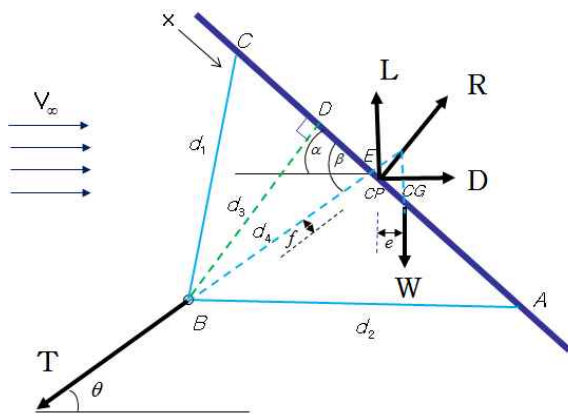


Fig. 6. 2-D FBD and geometry of Gaori kite

또한 받음각의 변화에 따른 연실-지평각에 대해 연의 시위선과 연실의 장력 연장선이 이루는 각도  $\beta$ 는 Fig. 6으로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$\beta = \theta + \alpha \quad (4)$$

어느 순간 평형 상태가 교란된다면 연은 평형을 이루기 위해 위로 올라가거나 아래로 내려갈 것이고 이 경우 (2)식으로 표현된 연실-지평각  $\theta$ 는 힘의 평형이 이루어질 때까지 계속 변할 것이다. 연이 올라가거나 내려가는 동작은 결국 열레의 연실과 지평선과의 각도  $\theta$ 를 변화시키고 동시에 열레를 중심으로 한 피칭 모멘트를 발생시킨다. 이는 분명 매듭점  $B$ 를 중심으로 연을 회전시키는 피칭 모멘트는 아니다. 왜냐하면 연실은 인장력만 받을 수 있는 유연체이고 방줄 또한 강체가 아닌 연실로 되어 있기 때문에 방줄의 매듭점  $B$ 가 힌지로 고정될 수가 없다. 이러한 연실-지평각  $\theta$ 의 변화는 연의 받음각  $\alpha$ 를 변화시키게 된다. 변화된 새 받음각은 연의 양력과 항력의 크기를 변화시키면서 압력 중심의 위치를 이동시킨다.

일반적인 연의 평형비행 조건은 연에 작용하는 힘들에 의한 피칭 모멘트가 밸런스를 이루어야 한다는 것이다. 일반적인 항공기는 6자유도에 대한 구속조건이 없어 피칭안정성을 만족하는 평형비행조건은 무게중심에 중심을 둔 피칭모멘트를 택한다[11]. 그러나 연의 경우는 방줄과 연실로 구속되어 있어 무게중심에서 피칭모멘트가 자유롭지 못하기 때문에 무게중심에 피칭 모멘트의 중심을 둔 해석은 물리적 현상과 어긋난다.

이러한 이유로 인해 연의 비행성능 해석에는 두 개의 접근 방법이 존재한다. 첫 번째 해석 방법은 NASA Kite modeler[12]의 기본적인 연 비행자세에 대한 성능해석 방법으로 Sah[7]가 인용한 것처럼 매듭점(bridle point)  $B$ 에 중심을 둔 피칭모멘트를 고려한 방법이다. 이 방법은 방줄의 매듭점이 고정된 힌지라고 한 가정에서 출발한다. 그러나 방줄의 매듭점  $B$ 는 앞에서 논하였듯이 고정되어 있는 힌지점이 아니고 열레로부터 시작되는 연실과 일체로 움직이는 점이기에 때문에 피칭모멘트 중심으로 삼기에는 무리가 있다. 즉 연은 연실의 구속조건 때문에 자체적인 피칭모멘트가 일어날 수가 없고 단지 열레를 중심으로 한 상승과 하강 동작이 자유로울 뿐이다. 매듭점  $B$ 에 중심을 둔 피칭안정성을 고려하면 장력  $T$ 는 공기력의 합력  $R$ 과 같은 값을 가져야 하며 장력  $T$ 의 연장선은 항상 연의 압력 중심점을 통과해

야 한다. 이 방법은 방줄의 상대적 길이를 먼저 정하고 주어진 유속에서 B에 중심을 둔 피칭모멘트가 0이 되는지를 검산하여 연의 받음각을 결정하는 역 계산 방법이다.

두 번째 성능 해석 방법은 연의 압력 중심에 작용하는 피칭 모멘트가 0이 되도록 연실의 장력과 공기력의 합력 그리고 연의 무게가 반드시 정렬되어야 한다는 평형이론에 근거를 둔 방법으로 Alexander와 Stevenson[13], Kang[2]의 논문에서 인용한 방법이다. 연에 작용하는 세 힘 벡터인 공기력의 합력  $R$ , 연의 무게  $W$ , 연실의 장력  $T$ 가 평형을 이루려면 세 힘의 작용선이 동일점에 모여야 하는데 연은 질량을 가지고 있고 연실의 무게도 고려해야 하기 때문에 세 힘의 작용선이 모이는 동일점은 압력 중심점에서 벗어난다. 그러므로 연의 압력중심에 대한 피칭 모멘트가 0이 되는 평형식을 고려하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$T \cdot f - W \cdot e = 0 \tag{5}$$

여기서  $f$ 는 장력  $T$ 의 연장선이 압력 중심점으로 내린 수선의 길이이며  $e$ 는 무게  $W$ 의 연장선으로부터 압력 중심점까지의 수선 길이이다. 그러므로 받음각의 변화에 따라 (1)식의  $x_{tr} - x_{CP}$ 를 알면  $e$ 와  $f$ 를 받음각의 함수로 계산할 수 있다. 이 방법은 연의 물리적 구속관계를 실제와 일치하게 적용한 것으로 연의 받음각 변화에 따라 방줄의 상대적 길이를 결정할 수 있는 순 계산 방법이다.

### 2.4 방줄의 모핑 해석 과정

Figure 6에서 보는 바와 같은 가오리연의 2차원적 기하 형상에서 AC의 길이  $d_{CA}$ 와 목줄의 길이  $d_1$ 이 주어졌을 때 풍수줄 길이  $d_2$ 는 삼각기하를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 변  $BE$ 의 길이  $d_4$ 는 다음과 같이 삼각형  $BCE$ 에 여현 법칙을 적용하여 구한다.

$$d_4^2 - 2d_4 d_{CE} \cos\beta + (d_{CE}^2 - d_1^2) = 0 \tag{6}$$

변  $BD$ 의 길이  $d_3$ 는 매듭점  $B$ 의 수선이 직각으로 시위선과 만나는  $D$ 점까지의 거리로서 직각삼각형  $BDE$ 로부터 얻을 수 있으며 변  $CD$ 의 길이  $d_{CD}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$d_{CD} = d_{CE} - d_4 \cos\beta \tag{7}$$

(6)식과 (7)식에서 삼각형  $ABD$ 의 두변의 길이를 구했으므로 나머지 변  $AB$ 의 길이인 풍수줄의

길이  $d_2$ 는 결국 다음 식으로 구한다.

$$d_2 = \sqrt{d_3^2 + (d_{CA} - d_{CD})^2} \tag{8}$$

여기서  $d_{CA}$ 는 C점에서 풍수구멍 A까지의 거리이다.

이상과 같은 가오리연 방줄의 모핑 해석과정을 요약하면 다음과 같다. 해석하고자 하는 가오리연 제원과 공력 계수 곡선 및 (1)식의 압력중심 위치에 대한 자료를 이용하여 주어진 받음각에 대해 피칭안정성을 만족시키는 (2)식으로부터 (5)식까지의 양들을 선택한 유속  $V_\infty$ 에서 계산한 다음 방줄의 기하학적인 관계식인 (6)식부터 (8)식까지의 길이를 차례로 계산한다. 새로운 유속  $V_\infty$ 를 선택하여 위 계산 과정을 반복하면 결국 주어진 유속  $V_\infty$ 에서 받음각  $\alpha$  또는 연실-지평각  $\theta$ 에 대한 가오리연의 평형 비행 조건을 만족시키는 주어진 목줄  $d_1$ 에 대한 풍수줄  $d_2$ 의 길이가 결정된다.

### 2.5 방줄의 모핑 해석 결과 및 토론

Table 1은 해석하고자 하는 실제 가오리연에 대해 Fig. 6의 기체좌표에 따른 필요 포인트의 기하적인 수치와 무게 그리고 미리 정한 목줄  $d_1$ 의 길이이다. 대기조건은 표준해면고도이며 풍속은 2m/sec ~ 9m/sec를 고려하였다.

Figure 7과 Fig. 8은 상하 및 좌우 대칭형태인 Gaori\_32의 받음각  $\alpha$  (연실-지평각  $\theta$ )의 변화에 따라 평형 비행 상태를 만족시키는 고정된 목줄 길이  $d_1$ 에 대한 풍수줄  $d_2$ 의 상대적 길이를 해석한 결과를 보여주고 있다. 연을 띄우는 사람의 입장에서 보면 눈에 보이지 않는 상대풍과 연의 시위가 이루는 받음각  $\alpha$ 보다는 연이 얼마나 올라가 있는지를 보는 것 즉 연실-지평각  $\theta$ 가 중요한 잣대이다[14]. (2)식으로 구하는 연실-지평각  $\theta$ 는 풍속과 받음각에 따라 변하는 값이지만 그 차이가 10% 내외에서 변하기 때문에 괄호 안에는 편의상 5m/sec일 때의 연실-지평각을 대표값으로 표시하였다.

Table 1. Dimension of kite analysis

	Gaori_32	Gaori_35	Gaori_40
$x_A$	0.332m	0.371m	0.424m
$x_C$	0.12m	0.12m	0.12m
$x_{CG}$	0.226m	0.253m	0.293m
d1	0.212m	0.255m	0.303m
W	0.098N	0.147N	0.176N



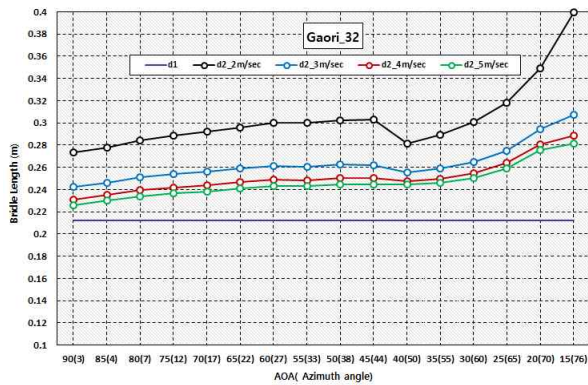


Fig. 7.  $d_2$  of Gaori\_32 (2m/s ~ 5m/sec)

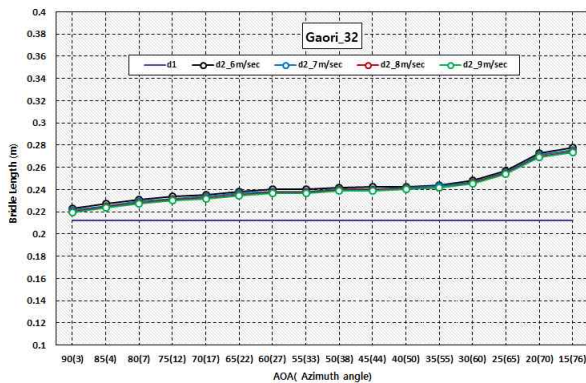


Fig. 8.  $d_2$  of Gaori\_32 (6m/s ~ 9m/sec)

Figure 7은 풍속이 2m/sec에서 출발하여 5m/sec까지 1m/sec 간격으로 증가시켰을 때 고정 값인  $d_1 = 0.212m$ 에 대한 풍수줄  $d_2$ 의 상대적 길이를 보여주고 있다. Fig. 8은 6m/sec에서 출발하여 9m/sec까지 1m/sec 간격으로 증가시켰을 때의 고정 값인  $d_1 = 0.212m$ 에 대한 풍수줄  $d_2$ 의 상대적 길이를 나타낸 그래프이다.

Table 2는 양력계수 값이 최대를 보이는 받음각  $\alpha = 40^\circ$  (연실지평각  $\theta = 50^\circ$ )일 때 풍속에 따른  $d_2$ 의 모핑 변화 값을 정리하였다. 풍속이 2m/sec일 때 풍수줄  $d_2$  길이가 목줄  $d_1$ 에 비해 33% 증가해야 평형 비행을 할 수 있으며 3m/sec일 때는 20% 5m/sec일 때는 15%, 7m/sec이상일 때는 13%로 평형비행을 위해 더 이상 풍수줄의 길이를 증가시킬 필요가 없다는 것을 보여주고 있다. 이는 바람이 2m/sec처럼 약할 때 풍수줄의 길이를 조금 더 늘려 연의 받음각을 증가시키면 약한 바람에도 연이 뜰 수 있고 7m/sec 이상 강해지면 방줄의 상대적 길이를 더 이상 조정하지 않아도 연이 잘 뜬다는 것을 증명하고 있는 것이다. 이러한 풍속 5m/sec 이

Table 2.  $d_2$  of Gaori\_32 ( $\alpha = 40^\circ$ )

$V_\infty$	$d_1$	$d_2$	% increase
2m/sec	0.212m	0.281m	33%
3m/sec	0.212m	0.255m	20%
4m/sec	0.212m	0.247m	17%
5m/sec	0.212m	0.244m	15%
7m/sec	0.212m	0.241m	13%
9m/sec	0.212m	0.240m	13%

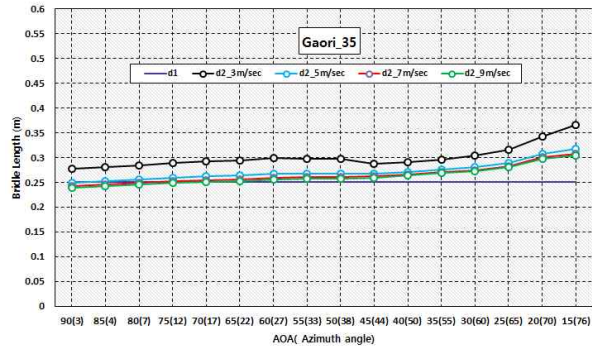


Fig. 9.  $d_2$  of Gaori\_35 (3m/s ~ 9m/sec)

Table 3.  $d_2$  of Gaori\_35 ( $\alpha = 35^\circ$ )

$V_\infty$	$d_1$	$d_2$	% increase
3m/sec	0.251m	0.290m	15%
5m/sec	0.251m	0.271m	8%
7m/sec	0.251m	0.266m	6%
9m/sec	0.251m	0.264m	5%

상의 결과는 Pochubay[15]가 수집하여 정리한 정 마름모 꼴 형태의 홍콩 싸움연과 칠레의 볼라틴(Volatin) 연의 방줄의 상대적 길이와 유사하다.

이러한 방줄의 해석 결과는 연을 띄우는 사람들이 경험적으로 잘 알고 있는 사실과 일치한다. 즉, 바람이 약해 연이 잘 안뜰 때는 열레를 감으면서 상대풍의 속도를 증가시키거나, 방줄의 길이를 조정하여 받음각을 증가시키는 방법으로 연을 띄우고 바람이 7m/sec 이상 강해지면 방줄의 상대적 길이를 더 이상 조정하지 않아도 된다는 것이다.

Figure 9는 Gaori\_35에 대해 풍속이 3m/sec에서 출발하여 9m/sec까지 2m/sec 간격으로 증가시켰을 때 고정 값인  $d_1 = 0.251m$ 에 대한 풍수줄  $d_2$ 의 상대적 길이를 보여주고 있다.

Table 3은 Gaori\_35에 대해 받음각  $\alpha = 35^\circ$  (연실지평각  $\theta = 55^\circ$ )일 때 풍속에 따른  $d_2$ 의 모핑 변화 값을 정리하였다. 풍속이 3m/sec일 때

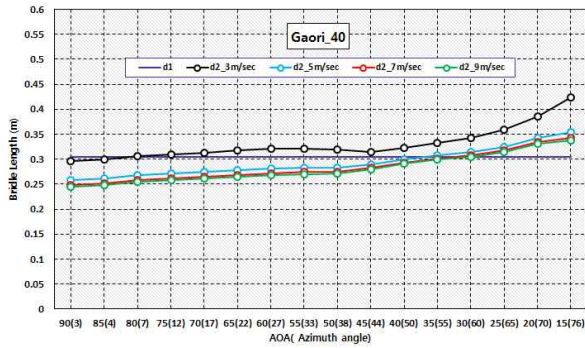


Fig. 10. d2 of Gaori\_40 (3m/s~9m/sec)

Table 4.  $d_2$  of Gaori\_40 ( $\alpha = 30^\circ$ )

$V_\infty$	$d_1$	$d_2$	% increase
3m/sec	0.304m	0.342m	12%
5m/sec	0.304m	0.314m	3%
7m/sec	0.304m	0.307m	0.9%
9m/sec	0.304m	0.305m	0.3%

풍수줄  $d_2$  길이가 목줄  $d_1$ 에 비해 15%, 5m/sec 일 때는 8%, 7m/sec일 때는 6%, 9m/sec이상일 때는 5% 증가시키면 평형 비행을 할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Figure 10은 Gaori\_40에 대해 풍속이 3m/sec에서 출발하여 9m/sec까지 2m/sec 간격으로 증가시켰을 때 고정 값인  $d_1 = 0.304m$ 에 대한 풍수줄  $d_2$ 의 상대적 길이를 보여주고 있다.

Table 4는 Gaori\_40에 대해  $\alpha = 30^\circ$  (연실지평각  $\theta = 60^\circ$ )일 때 풍속에 따른  $d_2$ 의 모핑 변화 값을 보여 준다. 풍속이 3m/sec일 때 풍수줄  $d_2$  길이가 목줄  $d_1$ 에 비해 12%, 5m/sec일 때는 3%, 7m/sec일 때는 0.9%, 9m/sec이상일 때는 0.3% 증가시키면 평형비행 조건을 충족시킨다. 이러한 가오리연의 평형비행 해석 결과는 연의 형태와 바람 속도에 따라 목줄과 풍수줄의 상대적 길이를 조금씩 변화를 주어야 평형 비행을 유지할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

이러한 분석으로 부터 비행 상황의 변함에 따라 형태를 달리하여 비행환경에 적응하는 모핑현상[16]이 Fig. 11처럼 가오리연의 평형비행 상태의 방줄 길이에서도 나타남이 관찰된다.

이와 같은 방줄의 모핑 변화 비행은 실시간으로 동작하는 조정장치로 방줄을 조정한다면 가능할 것이다. 그러나 실제로 연을 날리는 사람들이 실시간으로 변하는 받음각과 유속에 적응하는 이러한 모핑 비행을 실현한다는 것은 불가능하다. 연을 날리는 사람들은 일반적으로 전래되어온 전

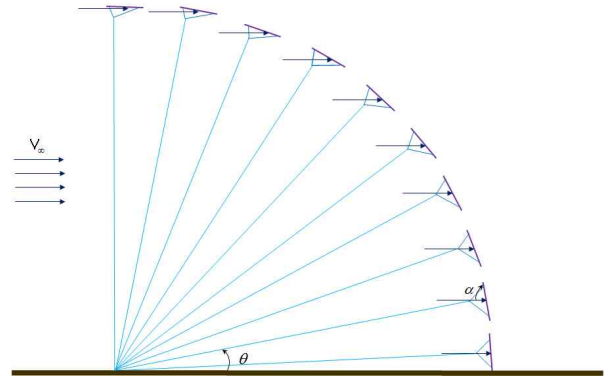


Fig. 11. Morphing of Bridle Length

통방법과 경험적 판단으로 연을 띄우기 전에 바람의 속도와 원하는 연실-지평각을 고려하여 즉 비행환경에 맞게 방줄을 조정한다. 가오리연을 날리고자 하는 사람들이 Fig. 7 ~ Fig. 10의 방줄의 모핑 해석 결과를 참고하면 항공역학적인 분석을 토대로 방줄의 상대적 길이를 조정하게 되며 비행성능을 최적으로 유지하는 연을 다룰 수 있게 될 것이다.

### III. 결 론

본 논문에서는 가오리연의 비행 중에 형성되는 모든 받음각 변화를 고려한 풍동 실험을 통해 가오리연의 공력 자료를 구축하였다. 이 공력 자료로부터 가오리연이 받음각 또는 연실-지평각이 변함에 따라 평형 비행 상태를 이루는데 필요한 목줄에 대한 풍수줄의 상대적 길이를 해석하였다. 해석 결과 목줄에 대한 풍수줄의 상대적 길이는 연의 시위 길이와 풍속에 전적으로 의존하고 있음을 알 수 있었다. 이는 비행환경에 맞게 형태를 변경하는 모핑 현상의 일종으로 받음각의 변화에 따라 방줄을 계속적으로 조정해야 한다는 것이다. 그러나 받음각이 변함에 따라 연의 방줄을 계속 조정한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 전래되어온 전통 방법과 경험에 의존한 판단으로 방줄을 조정해 날리던 사람들이 본 논문의 자료를 활용한다면, 비행환경에 맞게 그리고 원하는 연의 비행 자세에서 최적 성능을 유지하는 방줄의 상대적 길이를 사전에 조정하여 연을 띄울 수 있을 것이다.

### 후 기

본 논문은 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업의 일환으로 KEIT의 지원(모핑날개 적

용을 위한 SMPC 플랩모듈 개발)을 받아 수행된 연구의 일부이며 이에 감사드립니다.

## References

- 1) Kang, C. H., "A Study of Wind Tunnel Test of a Korean Traditional Bangpae Kite with the Wind Hole and Spanwise Curved Dihedral," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 39, No. 9, 2011, pp. 866~870.
- 2) Kang, C. H., "A Study on Trim Flight Condition for a Korean Traditional Bangpae Kite with Low Aspect Ratio", Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 39, No. 9, 2011, pp. 871~876.
- 3) Kang, C. H., "The Analysis of Wind Hole Effect for The Bangpae Kite," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 42, No. 7, 2014, pp. 561~566.
- 4) Kang, C. H., Kim, M. J. and De Montferrand, D., "A Study of Wind Hole Effect for The Korean Traditional Fighting Bangpae Kite", Takamatsu, APISAT 2013
- 5) Kang, C. H., A study of aerodynamic performance analysis for the various shape of flying kite and its fusion of design factor, Korea Air Force Academy, 2013.
- 6) Kang, C. H, Kim, M. J., "An Analysis of The Traditional Bangpae Kite's Wind Hole Effect". Proceeding of the 2014 KSAS Spring Conference, 2014, pp. 125-128.
- 7) Sah, J. Y., "Numerical Analysis on the Tow Point of Gaori Kite", Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 44, No. 3, 2016, pp. 195~202.
- 8) George Webster, "How Kites Fly", The Kiteflier, issue 105 <http://www.thekitesociety.org.uk/Articles.html>
- 9) Kang, C. H, Chung, H. S., Kim, M. J., "A Measurement of Aerodynamic Force Coefficient of Gaori Kite from W/T Experiment". Proceeding of the 2016 KSAS Fall Conference, 2016.
- 10) Narlow. Rae, Pope, Low-Speed wind tunnel testing, 3rd edition, John Wiley & Sons, 1999.
- 11) Anderson, J. D., Introduction to Flight, Fifth Edition, New york: McGraw-Hill, 2005.
- 12) NASA Kite Modeler, <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/kiteprog.html>
- 13) Alexander, K. and Stevenson, J., "Kite Equilibrium and Bridle Length," The Aeronautical Journal, Vol. 105, No. 9, 2001, pp. 535-542.
- 14) Kang, C. H, Suk, J. Y., "An Aerodynamic Analysis of Bridle Length and Morphing for Fighting Kites". Proceeding of the 2016 KSAS Fall Conference, 2016.
- 15) Pochubay, R., Fighter Kites, Presented by The Korean Kite Fliers Society, 2014.
- 16) Valasek, J., Morphing Aerospace Vehicles and Structures, John Wiley & Sons, Ltd., 2012.