

技術論文

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.9.871

작은 가로세로비를 가진 전통 방패연의 평형 비행 조건 연구

강치행*

A Study on Trim Flight Condition for a Korean Traditional Bangpae Kite with Low Aspect Ratio

Chi-Hang Kang*

ABSTRACT

In this paper, the equilibrium flight conditions of a Korean Traditional Bangpae Kite with low aspect ratio were analyzed by its aerodynamic data of wind tunnel test. The data of aerodynamic forces and center of pressure of the Kite were used to calculate the relative length of bridles to satisfy the condition of settling the kite to the static equilibrium steady state between $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$. From this equilibrium flight performance analysis, we obtained $(0.88 \pm 0.02)c$ of the rear bridle length corresponding to $0.88c$ of fixed front bridle length. These results were exact agreement with the relative bridle lengths by Korean classical method.

초 록

본 논문에서는 작은 가로세로비를 가진 전통 방패연의 풍동실험 공력자료를 이용하여 평형 비행 성능을 분석하였다. 공력 및 압력 중심 위치로부터 전통 방패연의 정적 평형 비행조건을 충족시키는데 필요한 목줄과 공수줄의 상대적 길이를 산출하였다. 연을 띄우기에 적합한 연실-지평각 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 에서 고정된 목줄 길이 $0.88c$ 에 대해 공수줄의 길이는 $(0.88 \pm 0.02)c$ 범위 내에 있었다. 이러한 전통 방패연의 평형 비행 성능 분석을 통해 얻은 목줄과 공수줄의 상대적 길이는 전통적 벌잇줄 매기법에 의한 길이와 정확히 일치하였다.

Key Words : Korean Traditional Bangpae Kite(전통 방패연), Wind Tunnel Test(풍동 실험), Aerodynamic Force data(공력 자료), Relative Length of Bridles(목줄-공수줄 상대적 길이), Equilibrium Flight Performance Analysis(평형 비행 성능 분석)

1. 서 론

우리나라의 전통 방패연은 그림 1에서 보는 바와 같이 앞전이 스펀 방향으로 상반각을 갖도록 휘어져 있으며 가운데 바람구멍(방구멍)이 있

는 독특한 구조의 날개 비행체[1]이다. 대나무를 얇게 깎아 만든 5개의 덧살을 설계도에 따라 제단한 전통 한지에 붙일 때 방구멍 가운데가 약간 볼록 나오게 하면 바람 받는 면 전체가 물고기의 몸체와 같이 유선형인 방패연이 제작된다.

이렇게 제작된 방패연을 공중에 날리기 위해서는 앞전의 양 귀에 연결한 목줄과 공수 구멍에 연결한 공수줄을 한데 모아 매듭을 지은 벌잇줄에 연실을 매어야 하는데, 아무리 연을 잘 만들어도 이 벌잇줄을 잘못 매면 연이 뜨지 않는다.

† 2011년 4월 11일 접수 ~ 2011년 8월 12일 심사완료

* 정회원, 공군사관학교 항공우주기계공학과
교신저자, E-mail : 119chk@paran.com
충북청원군 남일면 쌍수리 사서함 2호

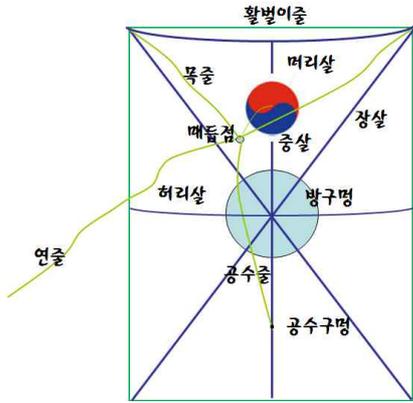


그림 1. 방패연의 구조 및 명칭

왜냐하면 목줄과 공수줄의 상대적인 길이에 따라 연의 자세각이 만들어지고 이 자세각은 상대풍과의 각도인 받음각을 결정짓기 때문이다.

전통적인 별잇줄 매기 방법에 따르면 앞전 양귀를 연결한 두 가닥의 목줄은 공수구멍까지 늘여서 이등변 삼각형을 형성하도록 길이를 맞추고 공수줄은 공수구멍으로부터 앞전의 한 귀까지 늘어 길이를 맞춘다. 이렇게 하면 목줄과 공수줄의 길이는 거의 1:1이 되지만 두개의 목줄은 양귀에 연결되어 이등변 삼각형을 형성하고 공수구멍은 연의 중앙선에 위치하기 때문에 목줄이 형성하는 이등변 삼각형의 수선 길이는 공수줄 길이보다 짧아 연의 머리가 앞으로 약간 숙여지는 자세가 나오게 되어 상대풍과의 받음각을 형성하게 된다. 방패연의 비행성능에 관련되는 이러한 설계 요소 및 정적인 평형 비행조건을 해석하려면 풍동 실험을 통하여 받음각 변화에 따른 방패연의 공력계수 및 압력중심 위치에 대한 자료를 확보하는 것이 필수적이다.

Alexander와 Stevenson[2]은 가로세로비가 1.5인 두 줄 연의 평형 안정 특성에 대해 이론 및 풍동실험을 통한 실증 연구를 수행하였다. 연에 관한 국내 학술 연구는 주로 한국 지연의 민속학적 관점에서의 역사[3-4]와 조형적 가치를 다룬 논문[5]이 있다. 공학적 관점에서는 Lee[6]가 대기 경계층 풍동에서 풍속과 방구멍 크기에 따른 연실의 장력을 측정하여 방패연의 기동성을 언급하였다. Kang[7-11]은 풍동에서 방패연의 공력 측정 실험 및 설계 요소 변경에 따른 방패연의 기능을 분석하는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 풍동실험을 통해 확보한 방패연의 받음각 변화에 따른 공력계수 및 압력중심 자료를 가지고 평형 비행 조건을 분석하였다.

이러한 분석을 통하여 방패연의 피칭모멘트가 별잇줄의 매듭점을 중심으로 균형을 이루는데 필요한 목줄과 공수줄의 상대적 길이를 연실-지평각 변화 또는 받음각 변화에 따라 산출하였다.

II. 본 론

2.1 방패연의 비행원리

그림 2에서 보는 바와 같이 방패연에는 공기력의 합력인 R , 연의 무게 W , 연실의 인장력 T 가 작용한다. 연이 질량이 없는 물체라면 연실의 인장력 T 를 연장한 점선은 공기력의 중심점인 압력 중심점을 지나야 할 것이지만 연은 질량을 가지고 있기 때문에 연실과 무게의 연장선의 교차점은 압력 중심점에서 벗어난 곳에 위치한다. 방패연의 비행 특성은 연에 작용하는 힘의 상대적인 크기와 연의 어디에 이 힘들이 작용하는가에 달려있다. 공기역학적인 힘인 양력과 항력은 공기력의 중심인 압력 중심에 작용하며 연실의 인장력은 별잇줄의 매듭점에 작용한다.

연의 평형상태 및 피칭 안정성은 무게중심을 통해 작용하는 연의 총 중량에 관계되기 때문에 그 위치는 매우 중요하다. 연의 평형 상태와 안정성을 결정하기 위해서는 반드시 공기역학적인 힘의 크기와 작용점인 압력 중심의 위치를 알아야 하는데 받음각에 따라 공기역학적인 힘은 크기가 달라지기 때문에 합력 작용점인 압력중심의 위치도 달라진다.

이러한 힘들이 작용하고 있는 방패연이 평형 비행을 위한 정적인 평형조건은 다음 식으로 표현된다.

$$L = W + T \sin \theta \tag{1}$$

$$D = T \cos \theta \tag{2}$$

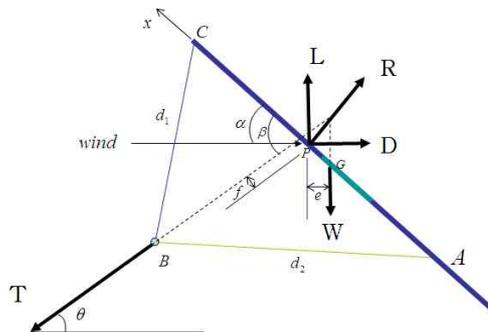


그림 2. 2-D 방패연에 작용하는 힘들

(1)식과 (2)식으로부터 인장력 T 가 작용하는 연실과 수평선이 이루는 연실-지평각 θ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{L - W}{D}\right) \quad (3)$$

어느 순간 평형 상태가 교란된다면 연은 평형을 이루기 위해 위로 올라가거나 아래로 내려갈 것이다. 이 경우 (3)식으로 표현된 연실-지평각은 힘의 평형이 이루어질 때까지 계속 변한다. 연이 평형을 이루고 있지 않다면 공기력의 합력 R 과 연의 중량 W 는 매듭점 B 를 중심으로 연을 회전시키는 피칭 모멘트를 발생시키고, 이 피칭 모멘트는 연의 받음각 α 를 변화시킨다. 변화된 새 받음각은 연의 양력과 항력의 크기와 방향을 변화시키면서 압력 중심의 위치를 이동시키게 되고 압력 중심의 이동은 매듭점을 중심으로 작용하는 피칭 모멘트에 영향을 미친다. 따라서 방패연의 평형 비행 조건은 매듭점을 중심으로 회전하는 피칭모멘트가 0이 되는 것이며 이를 만족하는 연실-지평각 θ 와 양항비가 방패연에 작용해야 한다. 연실의 인장력 T 의 크기는 다음과 같이 결정된다.

$$T = \sqrt{(L - W)^2 + D^2} \quad (4)$$

2.2 방패연의 공력 평형 비행조건

방패연을 날리는 사람은 누구나 매듭점에서 목줄과 공수줄의 상대적인 길이가 연의 받음각 α 와 연실과 지평선이 이루는 연실-지평각 θ 를 조정하는 가장 중요한 요소임을 잘 알고 있다. 전통적인 벌잇줄 매기 방법에 따르면 목줄과 공수줄의 길이는 거의 1:1이다. 이러한 전통적 벌잇줄매기 방법은 방패연 설계에 있어 과학적인 근거에 의한 것일까? 이러한 궁금증을 풀기위해 방패연의 평형 비행에 대한 정적 성능 해석이 필요하다. 왜냐하면 방패연에 작용하는 힘들이 평형을 이루는 비행 자세를 만드는 것은 목줄과 공수줄의 상대적 길이이기 때문이다.

(3)식을 보면 연의 무게가 L 보다 큰 경우가 있을 수 있는데 이런 경우는 연의 무게가 양력보다 큰 경우로서 연실-지평각은 음이 되는데 이는 연이 무거워서 뜨지 못하는 상태를 의미한다. 받음각의 변화에 따른 연실-지평각에 대해 연과 연실의 장력 연장선이 이루는 각도 β 는 그림 2로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\beta = \theta + \alpha \quad (5)$$

방패연의 정적 평형 비행조건은 연에 작용하

는 힘들에 의한 피칭 모멘트가 밸런스를 이루어야 한다는 것이다. 즉 피칭 모멘트가 0이 되도록 연실의 장력과 공기력의 합력 그리고 연의 무게가 반드시 정렬되어야 하는데, 이는 다음과 같이 압력 중심에 대한 모멘트 평형식을 만족시킬 때 얻어진다.

$$\sum M_{cp} = T \times f - W \times e = 0 \quad (6)$$

여기서 f 는 인장력 T 의 연장선이 압력 중심점으로 내린 수선의 길이이다. x_p 를 앞전에서부터 압력 중심점까지의 거리라고 할 때, e 는 무게 W 의 연장선으로부터 압력 중심점까지의 수선 길이이다. x_G 를 연의 앞전에서부터 연의 무게중심까지의 길이라고 하면 그림 2의 기하학적인 관계로부터 e 는 다음 식으로 표현된다.

$$e = (x_G - x_p) \cos \alpha \quad (7)$$

(7)식을 (6)식에 대입하면 다음과 같이 매듭점과 압력 중심과의 거리에 관한 식을 받음각 α 의 함수로 표현할 수 있다.

$$f = \frac{W}{T} \cdot (x_G - x_p) \cos \alpha \quad (8)$$

그림 3에서 보는 바와 같은 방패연의 기하학적인 형상에서 스펠길이 b 와 시위 길이 c 목줄의 길이 d_1 이 주어졌을 때 공수줄 길이 d_2 는 다음과 같이 삼각 기하를 이용하여 구할 수 있다. 삼각형 BCE 에서 변 BC 의 길이 d_3 는 목줄의 길이 d_1 으로 이루어지는 2등변 삼각형의 꼭짓점 B 의 수선이 직각으로 C 점에서 만나 형성되는 삼각형의 한 변이므로 목줄의 길이 d_1 과 스펠길이 b 에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (9)$$

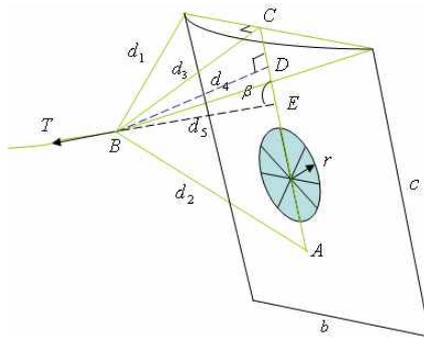


그림 3. 방패연의 3-D 기하

앞전으로 부터의 길이로 표시한 변 CE 의 길이 x_E 는 다음과 같이 표현된다.

$$x_E = x_P - \frac{f}{\sin\beta} \tag{10}$$

(10)식의 x_E 를 구하려면 연의 압력 중심점 x_P 의 위치를 알아야 하는데 이를 얻기 위해 풍동 실험으로 연의 공력을 측정하고 받음각에 따른 압력 중심점을 찾아야 한다[8].

변 BE 의 길이 d_5 는 다음과 같이 삼각형 BCE 에 여현 법칙을 적용하여 구할 수 있다.

$$d_3^2 = d_5^2 + x_E^2 - 2d_5 x_E \cos\beta \tag{11}$$

d_5 는 2차방정식인 (11)식에 근의 공식을 대입한 결과로 다음과 같이 표현된다.

$$d_5 = \frac{2x_E \cos\beta \pm \sqrt{(-2x_E \cos\beta)^2 - 4(x_E^2 - d_3^2)}}{2} \tag{12}$$

(12)식에서 제곱근 앞의 양수로 구한 근은 매듭점의 위치가 그림 3처럼 연의 앞쪽에 있음을 의미하고 음수로 구한 근은 매듭점의 위치가 연의 뒤쪽에 있음을 의미한다.

이제 삼각형 ABD 를 고려하자. 변 BD 의 길이 d_4 는 매듭점 B 의 수선이 직각으로 시위선과 만나는 D 점까지의 거리로서 삼각형 BDE 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_4 = d_5 \sin\beta \tag{13}$$

앞전으로 부터의 길이로 표시한 변 CD 의 길이 x_D 는 다음과 같이 구한다.

$$x_D = x_E - d_5 \cos\beta \tag{14}$$

(13)식과 (14)식에서 삼각형 ABD 의 두변의 길이를 구했으므로 나머지 변 AB 의 길이인 공수줄의 길이 d_2 는 결국 다음 식으로 구할 수 있다.

$$d_2 = \sqrt{d_1^2 + (x_A - x_D)^2} \tag{15}$$

여기서 x_A 는 앞전에서부터 공수 구멍까지의 거리이다.

2.3 방패연의 공력 자료 [11]

방패연을 날리는데 적합한 바람의 속도는 $3m/sec \sim 5m/sec$ 이므로 풍동 시험부에서 실제 상황과 정확하게 일치하는 상사 조건을 만족시킬 수 있다. 표 1은 아음속 풍동실험을 통하여 공력을 측정된 방패연의 제원이다.

표 1. 제작 방패연의 제원(단위 m)

b	c	r	x_G	x_A
0.33	0.42	0.055	0.215	0.337

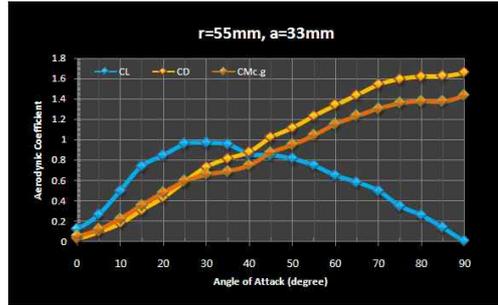


그림 4. 방패연의 공력 자료

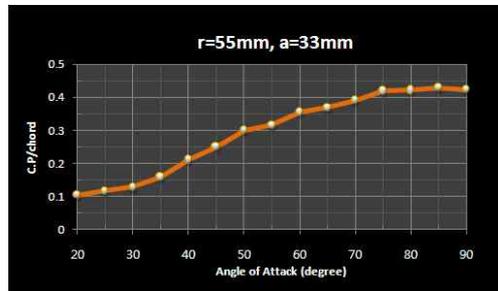


그림 5. 방패연의 압력 중심 위치

그림 4는 표 1의 제원으로 제작된 방패연에 대해 앞전 상반각 높이를 $a=0.033m$ 로 했을 때 받음각 변화에 대한 양력계수, 항력계수 그리고 무게중심에 대한 피칭모멘트계수의 그래프이다. 방패연은 최대 양력계수가 $\alpha=30^\circ$ 근처에서 $C_{L_{max}}=1.05$ 의 값을 가지며 실속 현상이 뚜렷하게 나타나지 않으면서 $\alpha=90^\circ$ 까지 점진적인 양력 감소 경향을 보이고 있다. 항력 계수 값은 $\sin\alpha$ 와 같은 경향으로 증가하고 있으며 $\alpha=90^\circ$ 에서 최대 항력계수 값 $C_{D_{max}}=1.8$ 을 가진다. 또한 무게 중심에 대한 피칭 모멘트 계수 $C_{M_{cg}}$ 는 항력 곡선과 비슷하게 증가하고 있다.

그림 5는 받음각에 따른 압력 중심 위치를 시위 길이로 나눈 값으로 보여주고 있다. 받음각에 따른 방패연의 압력 중심 위치는 항상 무게중심보다 앞에 있음을 알 수 있다.

2.4 목줄과 공수줄의 상대적 길이

표 1의 방패연 제원과 실험시의 공기 밀도, 그림 4의 공력 계수 곡선 자료 및 그림 5의 압력

표 2. d_2 계산 엑셀시트 ($V=3m/sec$)

$\alpha(deg)$	L(N)	D(N)	XP	R(N)
30	0.707693	0.544847	0.259126	0.893134
35	0.660409	0.550341	0.245318	0.85966
40	0.589679	0.598214	0.26483	0.839989
45	0.572904	0.709165	0.290339	0.911665
50	0.548085	0.743794	0.302581	0.923919
55	0.507962	0.822765	0.31611	0.966937
60	0.463915	0.882704	0.330255	0.997188
65	0.404859	0.958928	0.348388	1.04089
70	0.366109	0.978155	0.359493	1.044425

T	Theta	beta	f	d3
0.74738	43.1946	1.27743	0.05476	0.76648
0.71996	40.1503	1.31157	0.05685	0.76648
0.71602	33.3376	1.27994	0.04936	0.76648
0.80300	27.9790	1.27368	0.03622	0.76648
0.82283	25.3204	1.31455	0.03025	0.76648
0.87985	20.7542	1.32213	0.02352	0.76648
0.92240	16.8732	1.34167	0.01805	0.76648
0.98136	12.2768	1.34872	0.01281	0.76648
0.99280	9.85489	1.39371	0.00949	0.76648

XE	d5	d4	XD	d2
0.01482	0.77064	0.73771	0.20802	0.88671
0.01442	0.77005	0.74432	0.18296	0.90628
0.01364	0.77028	0.73793	0.20725	0.88732
0.01099	0.76963	0.73591	0.21431	0.88173
0.00946	0.76883	0.74372	0.18539	0.90440
0.00767	0.76833	0.74470	0.18142	0.90747
0.00612	0.76785	0.74778	0.16827	0.91755
0.00457	0.76748	0.74863	0.16446	0.92046
0.00346	0.76708	0.75509	0.13165	0.94508

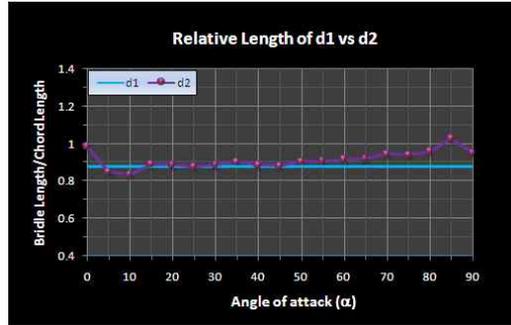


그림 6. 받음각에 따른 목줄-공수줄 길이

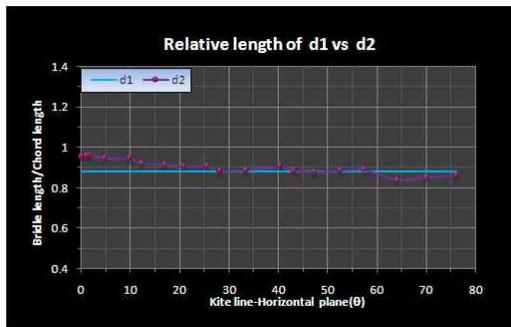


그림 7. 연실-지평각에 따른 목줄-공수줄 길이

중심 위치에 대한 자료를 이용하여 주어진 받음각에 대해 (3)식에서 부터 (15)식까지의 양들을 차례로 계산해나가면 결국 받음각 α 또는 연실-지평각 θ 에 대한 방패연의 평형 비행 조건을 만족시키는 벌잇줄의 상대적 길이를 구할 수 있다. 표 2에 주어진 목줄 길이 $d_1 = 0.88c$ 에 대해 공수줄 길이 d_2 를 구하는 계산의 일부를 수록하였다.

그림 6은 풍동 유속 $3m/sec$ 에서 방패연의 받음각 α 변화에 따라 평형 비행 상태를 만족시키는 고정된 목줄 길이에 대한 공수줄의 상대적 길이를 나타낸 그래프이다. 받음각 15° 에서 65° 까지는 목줄과 공수줄의 길이가 거의 일치함을 보여 주고 있다.

그림 7은 풍동 유속 $3m/sec$ 에서 연실-지평각 θ 의 변화에 따라 방패연의 평형 비행 상태를 만족시키는 고정된 목줄 길이에 대한 공수줄의 상대적 길이를 나타낸 그래프이다. 연실-지평각 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 일 때 평형 조건을 만족시키는 공수줄의 길이는 거의 목줄의 길이와 같음을 알 수 있다. 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 일정한 목줄 길이에 대해 방패연의 평형 비행 상태를 만족시키는 공수줄의 길이는 받음각 또는 연실-지평각에 따라 달라짐을 보여주고 있다. 이는 연이 바람을 맞이하는 각도에 따라 양력과 항력의 크

기가 다를 뿐 아니라 압력 중심 위치도 변경되기 때문이다.

연은 정지 상태에 있는 것이 아니고 매순간마다 평형 점을 찾아 상승과 하강을 반복하면서 바람이 일정하게 부는 고도까지 상승하여 마치 정지한 것처럼 보이는 평형 비행 상태를 유지한다. 따라서 매순간 평형 상태에 따라 목줄과 공수줄의 길이를 변경시켜 가면서 연을 띄운다는 것은 불가능하다. 그러므로 이 고도에서 방패연이 순항 비행 즉 평형 비행 상태를 유지하도록 목줄과 공수줄의 길이를 맞추어 준다면 비행성능을 최대로 유지하는 효과적인 연의 설계가 될 것이다.

방패연을 띄우는 사람들은 연실과 지면의 각도가 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 사이가 연을 날리기에 가장 적합하고 이 각도에서 연이 순항 비행한다는 것을 알고 있다. 따라서 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 에서 평형 상태를 만드는 공수줄의 길이를 선택하여 매듭을 짓는다면 연의 비행 성능은 최대가 될 것이다. 그림 7을 보면 이 각도에서 목줄의 길이 $0.88c$ 에 대해 공수줄의 길이는 $(0.88 \pm 0.02)c$ 범위 내에 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 항공역학적 거동 특성 분석을 통해서 방패연의 피칭모멘트가 매듭점을 중심으로 균형을 이루는데 필요한 벌잇

줄의 상대적 길이를 연실-지평각 변화 또는 받음각 변화에 따라 산출 가능함을 보여주고 있다. 또한 목줄과 공수줄의 상대적 길이는 전통적인 벌잇줄 매기법에 의한 목줄과 공수줄의 상대적 길이와 정확히 일치함을 알 수 있었다.

III. 결 론

본 연구에서는 가로세로비가 0.74이며 스펠방향으로 곡면 상반각을 가진 방패연에 대해 풍동 실험에서 얻은 공력자료를 이용하여 평형 비행 조건을 분석하였다. 분석 결과 방패연의 피칭모멘트가 균형을 이루는데 필요한 목줄과 공수줄의 상대적 길이는 연의 순항 비행 각도인 연실-지평각 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 에서 목줄의 길이 $0.88c$ 에 대해 공수줄의 길이는 $(0.88 \pm 0.02)c$ 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 이러한 목줄과 공수줄의 상대적 길이는 전통적인 방법으로 매는 벌잇줄의 상대적 길이와 정확히 일치하였다.

이러한 결과는 우리 조상들의 슬기와 지혜가 배어나는 방패연의 과학성을 항공역학적 거동 특성 분석을 통해 입증한 사례 연구로서의 의미가 있다.

참고문헌

- 1) Nickel, K. and Wohlfahrt, M., *Tailless Aircraft in Theory & Practice*, Edward Arnold, 1994.
- 2) K. Alexander K. and Stevenson, J., "Kite Equilibrium and Bridle Length", *Aeronautical Journal*, Sept. 2001.

- 3) 박내경, "한국 지연에 관한 민속학적 연구", 전남대 교육대학원 석사 논문, 1977.
- 4) 이담주, "한국 지연에 관한 연구", *고문화* 13권, 한국 박물관협회, 1975.
- 5) 전원희, "연의 조형적 제작 가능성에 대한 실험적 연구", *이화여대 산업미술대학원 석사논문*, 1985.
- 6) 이선우, "한국 전통방패연의 거동에 관한 역학적 연구", *동의공대논문집*, 26권 1호, 2000.
- 7) 강치행, "전통연의 평형 비행 조건 연구", *한국 항공우주학회 추계 학술발표회 논문집*, 2008.
- 8) 강치행, "Low AR flying wing의 공력 측정 실험 연구", *한국 항공우주학회 2010 춘계 학술발표회 논문집 I*, 2010.
- 9) 강치행, "설계 요소 변경에 따른 전통연의 공력 특성 분석", *한국 항공우주학회 2010 추계 학술발표회 논문집*, 2010.
- 10) Kang, C. H. and Kim, I. G., "The Static Flight Performance Analysis of a Korea Traditional Kite", *14th Australian International Aerospace Congress*, 28.Feb.-3.Mar., Melbourne, Australia, 2011.
- 11) 강치행, "스펠 방향 곡선 상반각을 갖는 전통 방패연의 풍동 실험 연구", *한국 항공우주학회지* 제 39권 제 9호, 2011.
- 12) Abbott. I. H, Von Doenhoff, A.E., *Theory of Wing Sections*, Dover Publications, 1959.
- 13) Anderson, J. D., *Fundamentals of Aerodynamics*, 4th Edition, McGraw-Hill, 2001.
- 14) Anderson, J. D., *Introduction to Flight*, Fifth Edition, McGraw-Hill, 2005.