

방패연의 방구멍 효과에 대한 분석

강치행*

The Analysis of Wind Hole Effect for The Bangpae Kite

Chi-Hang Kang*

Department of aerospace Engineering, Korea Air Force Academy

ABSTRACT

Our Korean traditional cultural inheritance Bangpae Kite has the stable rectangular shield shape decorated with artistic paint or poem and a good flight performance due to the central wind hole. In this paper, to analyse the wind hole effect to kite performance we performed the wind tunnel testing of the various design factor of kite model and air flow visualization passing through the wind hole. As the result of aerodynamic analysis, we knew that the wind hole of kite displays similar function of slot system for the wing high lift device. This fact demonstrates that our ancestor understood the function of slot system and applied effectively to the development of kite flight performance.

초 록

우리 민족 고유의 전통 문화유산인 방패연은 안정적인 장방형 표면에 다양한 그림과 글씨로 예술성을 표현하고 있으며 가운데 방구멍이 있음으로 해서 우수한 비행성을 갖는다. 본 논문에서는, 방구멍이 연의 성능에 미치는 공기역학적인 효과를 분석하기 위해 다양한 비율의 방패연 모델에 대한 공력 측정과 방구멍을 관통하는 공기흐름을 가시화하는 실험을 수행하였으며 이를 분석한 결과 방구멍은 경계층 분리를 제어하는 날개 고양력 장치의 슬롯 시스템과 유사한 기능을 발휘한다는 것을 알 수 있었다. 이는 우리 조상들이 서양의 비행기 발명 이전에 고양력장치의 원리를 이해하여 연의 비행 성능 개선에 효과적으로 적용하여 왔다는 것을 증명한다.

Key Words : Bangpae kite(방패연), Wind hole(방구멍), Wind tunnel test(풍동실험), Flow visualization(흐름가시화), Kite flight performance(연 비행성능), Slot system(슬롯 장치)

1. 서 론

일반적으로 연이 좌우로 요동치는 것을 막기 위해 뒷전에 꼬리를 단다. 뒷전에 꼬리를 달면 연실 끊어먹기와 같이 싸움을 해서 이겨야 하는 시합에서는 기동성이 제한된다. 연의 표면에 다양한 그림을 그려서 높이 올리거나 전시효과를 목적으로 하는 다른 나라의 연을 보면 꼬리가 달려있

거나 여러 개의 연실로 연을 조종하는 것을 볼 수 있다. 이러한 다른 나라의 연과 달리 외출 연실로 조종하는 싸움연으로 발전해온 우리나라 방패연에는 한가운데 방구멍이 뚫려 있다[1]. 이 방구멍은 공중에 높이 연을 띄우는데 필요한 안정성과 싸움연에서 요구되는 기동성을 모두 갖추기 위해 우리 조상들이 고안해낸 고양력장치 및 안정성 증대장치로서 항공역학적인 분석을 통해 이

† Received: December 31, 2013 Accepted: June 4, 2014

* Corresponding author, E-mail : chkang04@daum.net<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

를 고증할 필요성이 있다.

2009년 이전의 방패연에 대한 공학적인 학술 연구는 대기 경계층 풍동에서 풍속과 방구멍 크기에 따른 연실의 장력을 측정하여 방패연의 기동성을 언급한 이선우의 논문[2]이 유일하다. 그러나 [2]는 대기 흐름을 이용한 자연 조건에서 연실의 장력을 측정한 것으로 계량적이라기보다는 추정적인 값을 제시하고 있어 과학적이지 못한 점이 있다. 2009년부터 방패연의 과학적 구조와 항공역학적 기능을 체계적으로 분석하는 연구는 강치행[3-8]에 의해 진행되어 왔다. 저자는 논문 [3]에서 가로세로비가 작은 방패연의 공력 특성의 이론적 추정을 근거로 평형비행 조건을 분석한 결과 풍동실험을 통한 공력 측정의 필요성을 제기하였다. [4]에서는 풍동실험을 통한 공력 측정 결과와 곡면 상반각과 방구멍 크기에 따른 영향을 분석하였다. [5]에서는 풍동실험에서 얻는 공력 자료를 가지고 평형비행 상태를 유지하는 연의 성능을 분석하여 받음각을 결정하는 목줄과 풍수줄의 상대적 길이에 대한 해석을 통해 전통적 방출매기 방법의 원리를 찾아내었다. 그러나 모델을 설치할 때 0도에서 90도까지 받음각을 변경시킬 수 있게 특별히 제작한 지그와 밸런스에 T자형 스틱 스트러트로 밸런스에 연결함으로써 인한 장착 오차가 내재하였다.

본 연구에서는 방구멍이 연의 성능에 미치는 공기역학적인 효과를 분석하기 위해 다양한 비율의 방패연 모델에 대한 공력 측정과 방구멍을 관통하는 공기흐름을 가시화하는 실험을 수행하였다. 특히 모델장착에서 오는 측정오차를 줄이기 위해 T자 모양의 단순한 지그를 방패연 모델에 부착하고 받음각을 밸런스의 요우 방향으로 주는 방법을 사용하였다[6]. 받음각에 따른 공력 분포와 흐름 가시화 사진을 분석한 결과 방구멍은 경계층 분리를 제어하는 날개 고양력 장치의 슬롯 시스템과 유사한 기능과 함께 중양을 통과하는 바람기둥이 형성되어 연의 안정성을 증대시키는 기능이 있음을 발견하였다. 이는 우리 조상들이 서양의 비행기 발명 이전에 고양력장치의 원리와 안정성 증대 방법을 이해하여 방패연의 비행 성능 개선에 효과적으로 적용함으로써 꼬리가 없는 싸움연을 개발했다는 것을 증명한다.

II. 본 론

2.1 풍동실험 장비 및 공력 자료획득장치

자연 환경에서 방패연의 연싸움에 적합한 바람의 속도는 $3m/sec \sim 5m/sec$ 이다. 이러한 방패



Fig. 1. Kafa subsonic wind tunnel

연의 비행조건은 Fig. 1의 아음속 풍동 측정부에서 정확하게 실현시킬 수 있으며 6분력 피라미달 밸런스에서 측정한 공력자료는 자동 자료획득장치에 의해 그래프로 출력된다.

2.2 모델제작 및 흐름 가시화 장치

0.9m x 0.9m x 2.15m인 아음속 풍동 측정부의 봉쇄 효과를 고려하여 방패연의 실험 모델은 표 1과 같이 제작하였다. 전통적인 싸움연의 가로세로비인 1번 AR=0.85의 모델은 홍해명이 제작한 것이다[7]. 싸움연 주위의 공기흐름을 가시화시키기 위한 2번 모델은 스모크 와이어 기법을 사용하기 때문에 두께 2mm인 알루미늄으로 제작하였다. 3번에서 5번 모델은 AR의 크기를 다양하게 변화 시켜가면서 공력을 측정하기 위한 모델로 오제환이 제작하였다[8]. 이렇게 다양한 모델 형상에 대한 풍동실험은 방구멍과 가로세로비에 따른 방패연의 비행 성능을 분석하고 이를 sports kite 및 다양한 비행체의 형상 개발에 융합하기 위한 것이다[6].

Figure 1의 측정부 사진에서 보는 바와 같이 풍동 측정부에 단일 스트러트로 모델을 설치하는 방법은 연의 무게 중심부에 T자 모양의 단순한 지그를 부착하여 밸런스에 장착하는 것이다. 이

Table 1. Experiment model (unit:cm)

No.	AR	b	c	r (방구멍반경)	용도
1	0.85	40	47	6	공력측정
2	0.85	20	23.5	3	가시화
3	0.79	34	43	3,4,5,5,6,5	공력측정
4	1	43	43	3,4,5,5,6,5	공력측정
5	2	30	15	1.1,1.4,2.2,3	공력측정
6	3	45	15	1.1,1.4,2.2,3	공력측정

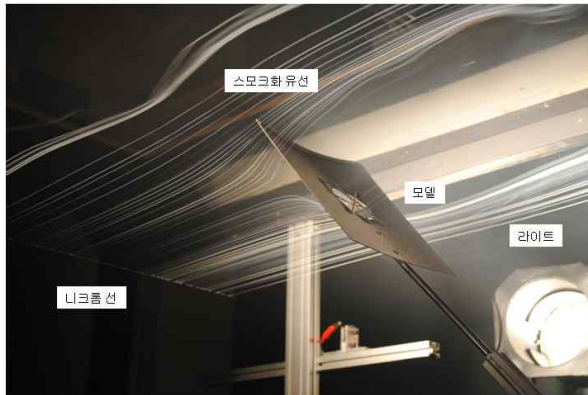


Fig. 2. Flow visualization system

러한 모델 장착은 스트러트를 Yaw 방향으로 360° 회전이 가능한 밸런스의 작동 기능을 이용한 것이다. 스팅 마운트 방식[4]과 달리 이러한 T자 모델 장착 방식은 밸런스에서 측정되는 모멘트 성분들의 값을 단지 실험 모델을 장착한 높이 (z축 성분)에 대해서만 보정하면 되기 때문에 피칭 모멘트를 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있다.

방패연 주위의 공기흐름 가시화는 Fig. 2와 같이 실험 모델의 전방에 0.3mm의 니크롬선을 설치하여 파라핀과 엔진오일을 3:1로 혼합한 액체를 니크롬선에 균일하게 바른 후 전류를 공급하여 연기를 발생시켜 유선을 형성하게 하였다. 유선화된 연기흐름이 잘 보이도록 모델의 양쪽 측면에 램프를 설치하고 고성능 카메라로 촬영하였다.

2.3 방구멍의 효과 분석

Figure 3은 방구멍이 없는($r=0mm$) 4개의 모델연에 대한 양력 측정 결과이다. AR=0.79와 AR=1인 모델 연은 받음각 $\alpha=40^\circ$ 에서 최대 양력 계수값 $C_{L_{max}}=1.4$ 와 $C_{L_{max}}=1.3$ 을 각각 보여 주고 있으며 실속 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. AR=2와 AR=3인 모델 연은 최대 양력 계수가 $\alpha=10^\circ \sim 50^\circ$ 범위에서 0.5~0.6의 값을 가지며 $\alpha=50^\circ$ 이후 서서히 양력은 줄어들고 있다. Fig. 4는 방구멍이 있는 4개의 방패연 모델에 대한 양력 측정 결과로서 AR=0.79인 방패연의 경우 $\alpha=30^\circ$ 에서 최대 양력계수 값 $C_{L_{max}}=1.02$ 를 가지며 AR=1인 방패연의 경우 $\alpha=25^\circ$ 에서 최대 양력계수 값 $C_{L_{max}}=0.9$ 를 갖는다. 그러나 방구멍이 있는 AR=2와 AR=3인 방패연의 경우 최대 양력 계수가 $\alpha=15^\circ \sim 50^\circ$ 범위에서 0.7의 값을 가지며 $\alpha=50^\circ$ 이후 점차적으로 양력이 줄어들고 있다. 방구멍이 있으면 가로세로비가 다르

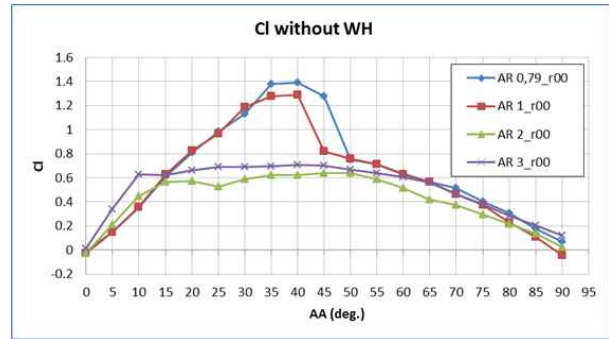


Fig. 3. Lift vs AOA (without wind hole)

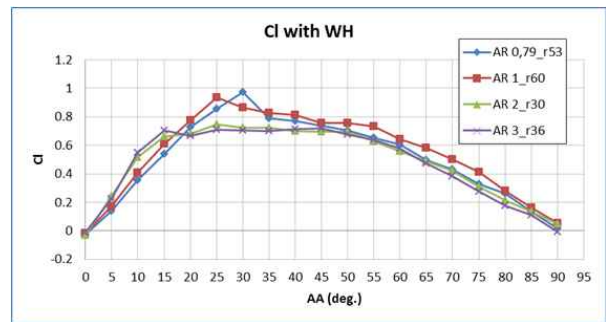


Fig. 4. Lift vs AOA (with wind hole)

더라도 실속현상이 뚜렷이 나타나지 않음을 알 수 있는데 이는 방구멍이 있음으로 해서 연이 안정적으로 공력 성능을 유지할 수 있다는 것을 증명한다.

Figure 5는 방구멍이 없는($r=0mm$) 4개 모델 연의 받음각에 대한 항력 측정 결과이다. AR=0.79 모델은 $\alpha=45^\circ$ 에서 AR=1인 모델 연은 $\alpha=40^\circ$ 에서 항력이 줄어들었다가 다시 증가하는 경향을 가지며 최대 항력은 $\alpha=90^\circ$ 에서 모두 $C_{D_{max}}=1.2$ 를 갖는다. AR=2와 AR=3인 모델 연의 항력은 $\alpha=90^\circ$ 에 이를 때까지 점진적으로 증가하며 역시 $\alpha=90^\circ$ 에서 모두 $C_{D_{max}}=1.0$ 을 갖는다.

Fig. 6은 방구멍이 있는 4개 모델 연의 받음각에 대한 항력 측정 결과이다. 방구멍이 없는 모델 연과 달리 방구멍이 있는 연에서는 항력이 줄어들었다가 다시 증가하는 불연속 현상이 나타나지 않고 있으며 $\alpha=90^\circ$ 에 이를 때까지 점진적으로 증가하고 $C_{D_{max}}=1.1 \sim 1.3$ 의 값을 갖는다.

이상에서 살펴본 바와 같이 방구멍은 실속각 이후의 양력 생성에 뚜렷한 영향을 미치고 있다. 그러나 항력의 증감에는 뚜렷한 영향을 미치지 않는다. 방구멍은 연 앞면의 중심 부근에 모이는 공기 흐름을 분산하여 뒷면으로 바로 보내는 역할을 함으로서 실속각 이후 항력 성분보다는 양

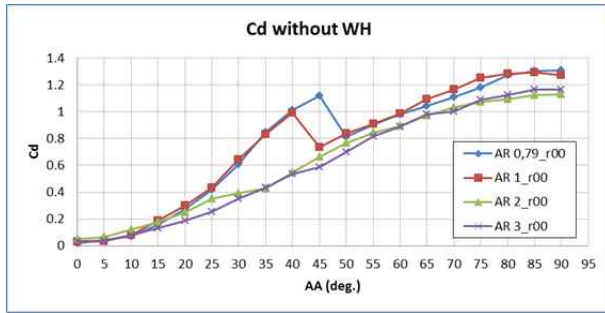


Fig. 5. Drag vs AOA (without wind hole)

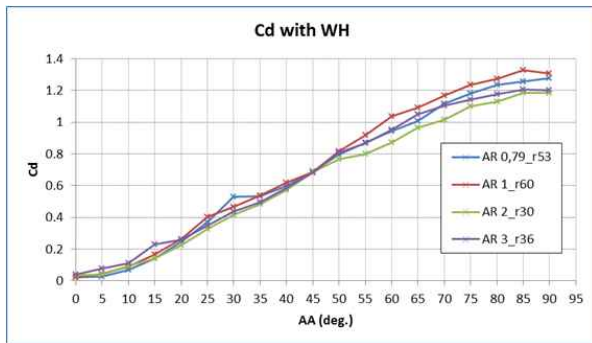


Fig. 6. Drag vs AOA (with wind hole)

력 성분에 의해 공력 균형이 이루어진다고 볼 수 있다. 방구멍이 크면 연의 면적이 상대적으로 작아지기 때문에 바람 속도가 강할 때 유리할 것이고 방구멍이 작으면 바람속도가 보다 약할 때 유리할 것이다. 따라서 연실을 풀 때는 바람이 약하고 연실을 감을 때는 바람이 강하기 때문에 연의 기동성은 방구멍의 크기에 달려 있다고 판단 된다.

2.4 흐름 가시화를 통한 공력 분석

Figure 7은 $V_{\infty} = 3m/sec$ 상태에서 $\alpha = 0^\circ$ 에서 $\alpha = 90^\circ$ 까지 10° 간격으로 받음각을 변화시키면서 방패연 모델 주위의 흐름을 가시화한 사진이다. Fig. 6의 좌측 사진들은 방구멍이 있는 경우이며 우측 사진들은 방구멍이 없는 경우의 공기흐름 양상이다. $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$ 에서는 방구멍을 통과하는 흐름이 분명하게 보이지 않지만 $\alpha = 20^\circ$ 부터는 방구멍을 통과하는 흐름이 분명하게 보인다. Fig. 8과 Fig. 9는 $\alpha = 30^\circ$ 에서 각각 방패연에 방구멍이 없을 경우와 있는 경우의 모서리 흐름을 위에서 찍은 사진들이다. 모서리 주변 흐름은 아랫면으로부터 윗면으로 감아 올라가면서 중앙 부근에서 만나 하류로 흐르고 있다. 아랫면에서 윗면으로 감아 올라가는 흐름 추세는 방구멍이 없는 경우가 있는 경우보다 매우 급하게 감기

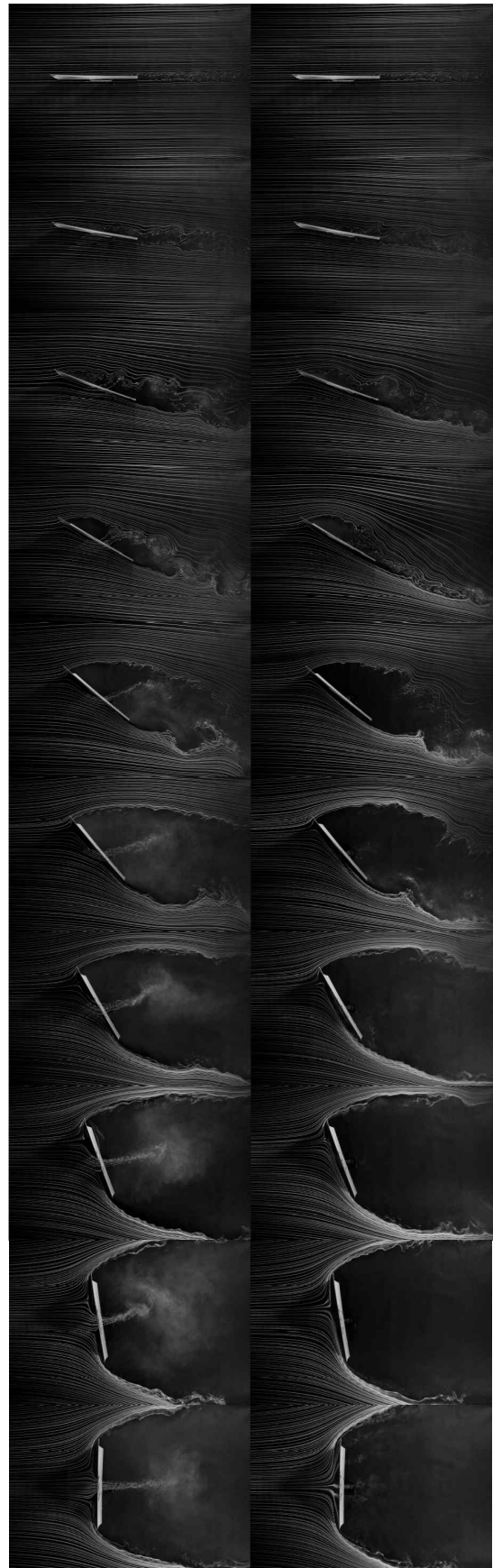


Fig. 7. Left (with W.H.) Right(without W.H.)

고 있다. 이러한 흐름 모양의 관찰을 통해 방구멍이 있는 경우는 방구멍에서 흘러나오는 공기흐름의 운동 에너지가 회전류에 에너지를 보충하여 준다는 것을 알 수 있다. 이러한 운동에너지가 보충됨으로서 방구멍이 있는 경우는 윗면과 아랫면의 압력차가 점진적으로 변하여 부드러운 공력 곡선의 변화를 가져온다. 그러나 방구멍이 없는 경우는 이러한 방구멍을 통한 공기흐름의 운동 에너지 공급이 없기 때문에 모서리를 돌아가는 회전류는 압력이 낮은 윗면 중앙으로 급하게 모이게 되면서 공력 변화의 불연속성을 야기하게 된다. 이러한 현상 때문에 방구멍이 없는 경우의 공력 결과인 Fig. 3과 Fig. 5에 나타난 공력 곡선의 불연속성을 보여주고 있다고 판단된다.

모델 방패연의 공력 분석을 통해 받음각에 따라 양력과 항력의 변화는 방구멍이 없을 때보다 방구멍이 있을 때가 더 선형적으로 변화한다는 것을 알았다. 따라서 방구멍은 방패연의 공력 특성을 안정시키는데 결정적인 역할을 한다고 판단된다. 이러한 방구멍이 안정성에 미치는 효과는 연의 공력 생성 메커니즘과 연관이 있다. 바람이 방구멍을 통과할 때 연의 중심을 유지하는 에너지가 생성된다면 안정성이 향상될 것이다.

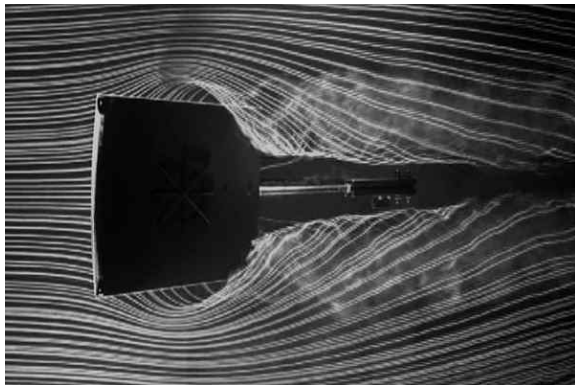


Fig. 8. Kite without W.H. ($\alpha = 30^\circ$)

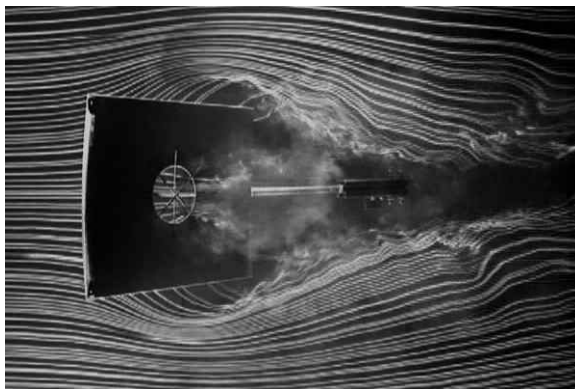


Fig. 9. Kite with W.H. ($\alpha = 30^\circ$)

Figure 7의 작은 받음각($\alpha = 20^\circ$)을 갖는 방패연 주위의 흐름 가시화 사진을 보면 아랫면을 흐르는 공기흐름이 방구멍을 통해 윗면으로 올라오면서 윗면에서 일어나는 흐름의 분리를 지연시키고 후류에 에너지를 공급하는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 이러한 방구멍의 역할은 날개의 고양력 장치의 성능을 향상시키기 위해 공기구멍인 슬롯을 장치하는 것과 같기 때문에 한국 방패연의 방구멍은 세계 최초로 슬롯 시스템을 공력 성능 향상에 도입한 사례임이 분명하다고 본다.

방패연을 날리는 사람들이 선호하는 연의 받음각은 고 받음각인 30° 에서 50° 사이로 관찰된다. 이러한 고 받음각에서 매우 작은 가로세로비($AR=0.79$)를 가진 방패연 주위의 공기흐름 양상은 평판 삼각날개(delta wing) 주위의 유동 [11] 양상과 많은 유사점을 갖고 있다. 방패연의 경우 와류는 위와 아래 및 양 옆 모서리 그리고 방구멍 주위에서 모두 발생한다. 고 에너지이며 흡인력이 강한 이러한 와류에 의해 방패연은 $\alpha = 30^\circ$ 의 큰 받음각에서 $C_{L_{max}} = 1.0$ 의 값을 갖는다(Fig. 4).

방구멍을 통과하는 공기흐름은 연의 중앙을 통과하면서 생기는 공기 질량의 운동량과 공기 기둥이 연을 받혀주는 효과로 인해 연은 중심잡기와 뜬 상태를 유지하는 부력을 얻는다. 또한 받음각이 커지면서 앞면에 부딪치는 공기흐름은 앞전 부근에서 갈라져 아랫방향으로 흐르면서 일부는 방구멍을 통과하고 나머지는 뒷전을 지나 와류를 형성한다. 이러한 바람의 변위(wind deflection)에 의한 양력 발생 원리는 다음과 같다. 아래로 내려가는 바람 벡터는 자유 흐름 벡터 V_∞ 와 수직 하방 성분 벡터 ΔV 의 합이므로 공기 질량에 수직 하방 속도를 곱한 운동량만큼 공기를 아래로 밀어내고 있으므로 이에 반작용으로 연은 위로 떠오르는 힘 즉 양력을 받는다. 이러한 방패연의 양력 발생 원리와 방구멍의 공력 효과를 Fig. 10에 표현하였다.

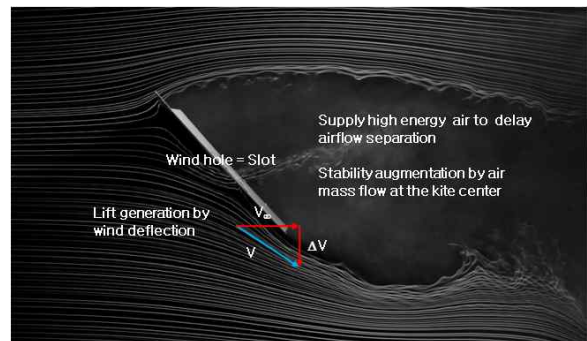


Fig. 10. Flow analysis of Bangpae kite

III. 결 론

방구멍이 연의 성능에 미치는 공기역학적인 효과를 분석하기 위해 다양한 비율의 방패연 모델에 대한 공력 측정과 방구멍을 관통하는 공기 흐름을 가시화하는 실험을 수행하였으며 이를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 방구멍이 있으면 가로세로비가 다르더라도 실속현상이 뚜렷이 나타나지 않는다.
- 나. 방구멍은 연 앞면의 중심 부근에 모이는 공기 흐름을 분산하여 뒷면으로 바로 보내는 역할을 함으로서 실속각 이후 항력 성분보다는 양력 성분에 의해 공력 균형이 이루어진다.
- 다. 바람이 방구멍을 통과할 때 연의 중심을 유지하는 에너지가 생성되어 안정성이 향상됨으로 연에 꼬리를 달 필요가 없어졌다.
- 라. 우리 조상들은 서양의 비행기 발명 이전에 방구멍이라는 고양력장치의 원리를 이해하여 방패연의 비행 성능 개선에 적용하였다.

후 기

본 논문은 공군사관학교 항공우주연구소의 국고 연구지원 (관리번호 : KAFA 13-8)을 받아 수행한 연구의 일부로 지원에 감사드립니다.

References

- 1) Chun, K. W., *The History and Folk Customs of Kite*, Korea·China·Japan, Taehaksa, Seoul, 1996.
- 2) Lee, S. W., "The mechanical study of Korea traditional Bangpae kite's behavior", *Journal of Donggeu University*, Vol. 26. No. 1, 2000.
- 3) Kang, C. H., "The static flight performance analysis of a traditional kite", *Journal of Korea Air Force Academy*, Vol. 60, 2009.
- 4) 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 KSASS*, Vol. 39. No. 9, 2011.
- 5) Kang, C. H., "A study on trim flight condition for a Korean Traditional Bangpae Kite with low aspect ratio", *Journal of KSASS*, Vol. 39. No. 9, 2011.
- 6) Kang, C. H., *A study of aerodynamic performance analysis for the various shape of flying kite and its fusion of design factor*, Report of KAFA, 2013.
- 7) Kang, C. H and Kim, I. G. "The static flight performance analysis of a Korea Traditional Kite", Melbourne, APISAT 2011, 2011.
- 8) 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, 2013.
- 9) Hong, H. M., *Fabrication of Bangpae Kite for Fighter (40cmx47cm, r=6cm)*, Korean Kite Figthers Club (<http://cafe.daum.net/yeonssaum>), 2013.
- 10) Oh, J. H., *Our Tradituonal Kite (http://ekitekorea.com)*, 2013.
- 11) Anderson, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th Edition, New york: McGraw-Hill, 2011.