

고 효율 제트 베인 설계를 위한 공기역학적 특성 연구

길경섭* · 정용갑** · 박종호***

The Study on Aerodynamic Characteristics for the Design of High Efficiency Jet Vane

G. S. Kil* · Y. G. Chung** · J. H. Park***

ABSTRACT

Of the various means for active trajectory correction, a thrust vector control system represents the only principle independent of missile external forces so that this method is operative.

The purpose of this study is to analyze the characteristic of jet vane TVC(Thrust vector control) system among mechanical jet deflection. To ensure high performance leading edge shape, aspect ratio and ablated condition is optimized. Supersonic flow system, jet vanes and nozzle with Mach number 2.88 and under expansion ratio 2 were designed to study aerodynamic characteristics of leading edge shape, aspect ratio and ablated conditions.

초 록

본 연구에서는 제트 베인의 선단부 형상과 종횡비에 따라 다르게 나타나는 공기 역학적 특성을 분석하였으며, 고속 고온의 가스에 의해 발생하는 제트 베인의 삭마형태에 따른 공기역학적 성능 감소를 분석하였다. 이 연구를 위해 압축 공기를 이용한 초음속 유동 시험 장치를 제작하여 마하수 2.88, 과소 팽창비 2인 유동을 모사하고, 제트 베인의 선단부 형상과 종횡비에 따른 공기역학적 특성 분석을 위해 형상이 다른 18종의 제트 베인을 제작하였으며, 또한 삭마율에 따른 공기 역학적 성능 감소를 분석하기 위해 원형과 원형 제트 베인의 10%, 20% 삭마된 베인을 제작하여, 제트 베인의 편향각을 0도에서 25도까지 5도 간격으로 변화 시켜가며 양력과 항력을 측정하여 삭마와 관련한 공기역학적 성능을 분석하였다.

Key Words: Jet Vane(제트베인), Aspect Ratio(종횡비), 후퇴각(Sweep Angle), Ablation(삭마)

기호설명

α	:	Sweep angle
Ls	:	Span length
Lc	:	Chord length
Ll	:	Lead length
t	:	Thickness
JV	:	Jet vane

† 2003년 6월 11일 접수 ~ 2003년 12월 4일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

** 정회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

*** 중신회원, 충남대학교 기계공학과 유체공학실험실
연락처, E-mail: kgs@kari.re.kr

1. 서론

로켓 추진에 의한 동력 비행 중에 비행체의 자세와 방향 제어를 위해서 공기역학적 핀(Aerodynamic fin)으로 비행체의 비행방향을 효과적으로 조종할 수 있다. 그러나 공기가 희박하고 고도나 발사 직후 저속에서는 동압의 부족으로 충분한 제어력을 발생시킬 수 없기 때문에 추력방향제어(Thrust Vector Control, TVC)를 사용하는 것이 효과적이다.^(1,2) Fig. 1은 수직 발사용 대잠로켓(Vertical Launched Anti Submarine Rocket)의 초기 기동 시에 추력 편향 제어하는 모습을 보여준다.

본 연구에서는 제트 베인의 선단부 형상과 종횡비에 따라 다르게 나타나는 공기 역학적 특성을 분석하였으며, 고속 고온의 가스에 의해 발생하는 제트 베인의 삭마형태에 따른 공기역학적 성능 감소를 분석하였다.

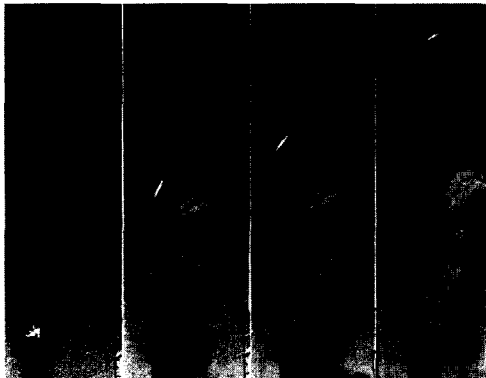


Fig. 1 Thrust vector control of VLOSROC

2. 본론

2.1 초음속 유동 장치

본 실험에서는 압축공기를 이용한 초음속 유동장치를 사용하였으며, Fig. 2는 유동장치의 개략도이다. 초음속 유동장치는 압축기, 건조기, 저장용기, 개폐 밸브, 유량제어 밸브, 저압 용기,

노즐, 제트 베인 장치와 각종 센서들로 구성되어 있다.

초음속 유동 장치의 작동 순서를 살펴보면, 압축기에서 압축된 공기는 건조기로 들어가 수분을 제거해 주고 저장용기에 저장되며, 저장된 압축 공기는 개폐 밸브로 열어 주어 유량제어 밸브를 통해 저압 용기로 들어가 노즐로 분사된다

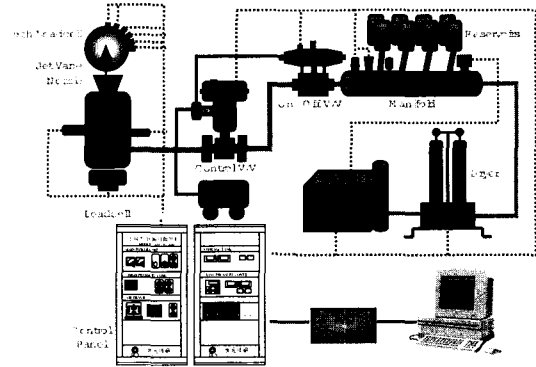


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 제트 베인

제트 베인의 선단부 형상과 종횡비가 공기역학적 특성 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 총 18종을 제작하였다. Fig. 3은 제트 베인의 형상을 결정하는 인자들을 알아보기 위해 도시하였다. 제트 베인은 선단부 길이인 스패ن(Span), 현의 길이인 시위(Chord), 선단부에서 변곡점까지 길이인 리드(Lead), 후퇴각(Sweep angle), 베인 두께(Thickness) 그리고 선단부 형상 등 총 6개의 인자로 구성되어 있다. Table 1과 같이 선단부 형상을 제외한 각 인자는 3개의 레벨로 나누고, Table 2와 같이 형상이 다른 18개의 제트 베인을 제작하였다. 또한 고온 고속의 연소 가스로 인해 삭마된 제트 베인의 공기역학적 성능 저하를 평가하기 위해 제작한 제트베인 원형과 10% 삭마된 베인, 그리고 20% 삭마된 베인을 제작 하였다.

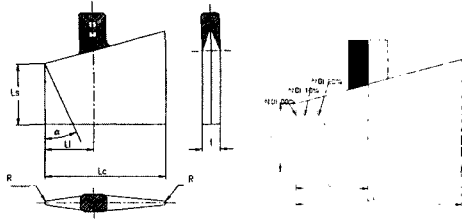


Fig. 3 configuration parameter of Jet vane

Table 1. Design parameters of Jet vane

Level	Leading edge shape	Ls (mm)	Lc (mm)	Ll (mm)	α (°)	t (mm)
1	Blunt (R =0.5)	12.3	24.7	10.7	0	3.0
2	Sharp	13.3	26.7	11.5	10	3.3
3		14.3	28.7	12.3	20	3.6

Table 2. Configuration of Jet vane

Jet vane	Parameter Level					
	R	Ls	Lc	Ll	A	t
JV1	1	1	1	1	1	1
JV2	1	1	2	2	2	2
JV3	1	1	3	3	3	3
JV4	1	2	1	1	2	2
JV5	1	2	2	2	3	3
JV6	1	2	3	3	1	1
JV7	1	3	1	2	1	3
JV8	1	3	2	3	2	1
JV9	1	3	3	1	3	2
JV10	2	1	1	3	3	2
JV11	2	1	2	1	1	3
JV12	2	1	3	2	2	1
JV13	2	2	1	2	3	1
JV14	2	2	2	3	1	2
JV15	2	2	3	1	2	3
JV16	2	3	1	3	2	3
JV17	2	3	2	1	3	1
JV18	2	3	3	2	1	2

2.3 실험 방법

좌표축은 Fig. 4과 같으며 피치 컨트롤 할 때에는 좌우에 있는 제트베인(H1, H2)을 Z방향으로 제어력이 작용하도록 0° 부터 25° 까지 5°

간격으로 각도 조절기를 이용하여 편향각을 변화시켜 가며 실험을 하였다. 챔버 압력은 60 kg/cm²로 0.4초 동안 유지하여 제트 베인 지지대에 부착되어 있는 6축 로드셀을 이용하여 선단부의 형상과 중형비가 양력과 항력에 미치는 영향력과 삭마상태에 따른 공기역학적 성능 저하를 분석하였다.

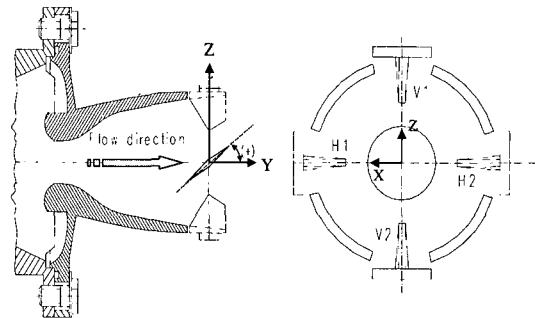


Fig. 4 Coordinate for the jet vane test stand

2.4 실험 결과 및 고찰

2.4.1 초음속 유동장치 성능 실험

Fig. 5는 이론식에^(3,4) 따라 계산한 챔버 압력에 따른 추력 값과 실험으로 측정된 추력 값으로서 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다.

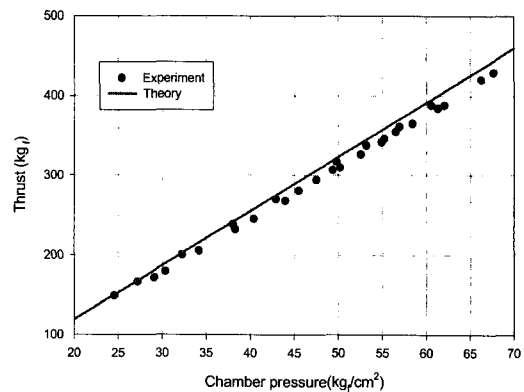


Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental thrust with various pressures

또한 이 실험 추력값은 이론 추력값과 3%이내의

오차를 보인다.

2.4.2 선단부와 중횡비에 따른 공기역학적 특성

제트 베인 18종을 통해 선단부 형상과 중횡비에 따른 공기역학적 특성을 분석해 보았다.

Fig. 6는 선단부의 형상이 항력 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 선단부 형상이 같은 JV1~JV9(Blunt)와 JV10~JV18(Sharp)의 항력계수를 평균하여 각각 편향각에 따라 나타낸 그래프이다. 편향각에 따른 항력은 편향각이 증가함에 따라 포물선 모양으로 급격히 증가하게 되며, 선단부가 무딘 제트 베인이 예리한 제트 베인보다, 더 큰 항력을 나타내었고, 편향각이 증가함에 따라 그 차이는 감소한다. 따라서 선단부 반경이 클수록 항력이 크게 나타나며, 선단부의 영향은 편향각이 작을 때 크게 나타나며, 편향각이 커짐에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 선단부의 형상이 양력 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 선단부 형상이 같은 JV1~JV9(Blunt)와 JV10~JV18(Sharp)의 양력계수를 평균하여 각각 편향각에 따라 나타낸 그래프이다. 제트 베인의 양력 특성을 살펴보면 편향각이 증가할수록 선형적으로 증가하다가 15°부터 기울기가 점점 감소하는데 이것은 베인 후단부에 박리(Seperation)로 인한 것으로 사료되며, 선단부의 형상에 따른 제트 베인의 양력은 큰 차이가 나지 않고 있으므로 선단부 형상은 베인의 양력에 대한 영향력이 작음을 알 수 있다.

Fig. 8은 양력대 항력비를 동일한 방법으로 나타내는 그래프이다. 양력대 항력비는 5°에서 15° 사이에서 최대가 되고 편향각이 증가함에 따라 다시 작아지며, 선단부 반경이 작은 제트 베인이 큰 제트 베인보다 더 좋은 양력대 항력비를 보여주고 최고(Peak)점 또한 더 작은 편향각에서 형성되고 있다.

Fig. 9는 제트 베인에 작용하는 항력으로 인한 추력손실을 나타내는 그래프이다. 선단부의 반경이 큰 제트 베인의 추력 손실이 더 크게 나타나고 있다.

결과적으로 선단부 반경이 작을수록 양항비 특성이 좋게 나타난다. 하지만 이 결과는 선단부 반경에 따른 양력 특성은 변화가 작고, 선단부 반경이 커짐에 따른 항력의 증가로 인한 것이므로 선단부 반경을 크게 설계하면 항력 증가에 따른 추력손실로 인해 미사일의 사거리는 짧아지나, 선단부 반경으로 인한 양력의 손실 없이 삭마율을 낮게 유지하여, 작동 시간을 늘릴 수 있다.

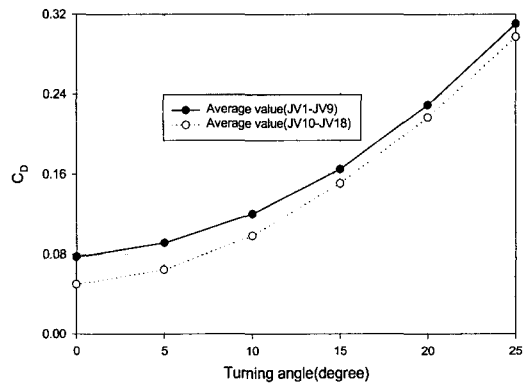


Fig. 6 Drag coefficient Comparison of jet vanes with different leading edge

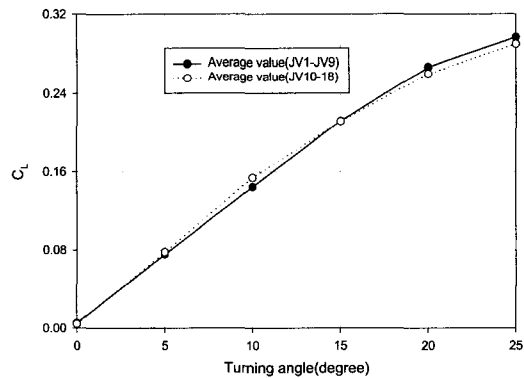


Fig. 7 Lift coefficient Comparison of jet vanes with different leading edge

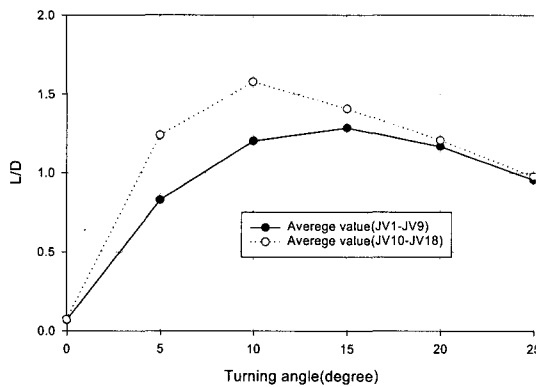


Fig. 8 L/D Comparison of jet vanes with different leading edge

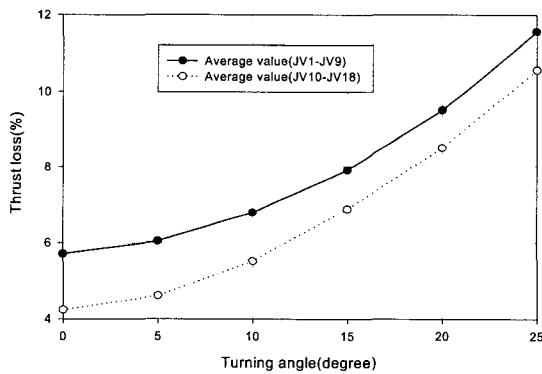


Fig. 9 Thrust loss Comparison of jet vanes with different leading edge

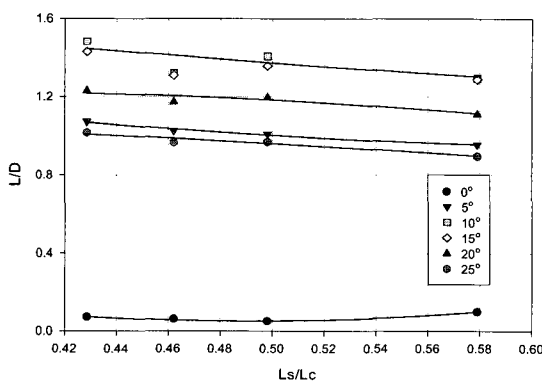


Fig. 10 L/D comparison of jet vanes with different aspect ratios

Fig. 10는 제트 베인의 종횡비에 따른 양항비를 보기 위해 도시한 그래프이다. 종횡비는 제트 베인의 스패น과 시위의 비이며, 일반적으로 종횡비가 작을수록 양항비는 증가하며 삭마율은 작아진다. 실험 결과를 살펴보면, 양항비에 대한 종횡비의 영향은 편향각 0° 일 때는 나타나지 않으나 편향각이 클 때 양항비의 차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 편향각이 충분히 클 때에는 종횡비가 작을 때 양항비가 커지므로 종횡비를 작게 설계해야 공기역학적 특성이 향상됨을 알 수 있다. 또한 종횡비를 작게 하면 삭마율 또한 작아지므로 공기 역학적 특성과 삭마율 두가지 모두 장점을 가지고 있어 제트 베인 설계시 작은 종횡비로 설계해야 함을 알 수 있다.

2.4.3 삭마상태에 따른 공기역학적 특성

삭마가 되지 않은 제트 베인과 삭마 되었을 때와 유사한 형상으로 투영 단면적의 10%, 20% 삭마된 베인을 Fig 3과 같이 제작하였다.

각 베인에 작용하는 양력과 항력을 측정하여 삭마상태에 따른 공기 역학적 성능 손실을 규명하였다.

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13는 편향각에 따라 제트 베인의 양력과 항력 및 양항비로 나타낸 것으로, 삭마상태가 심함에 따라 제트 베인의 양력 성능은 크게 감소됨을 알 수 있다. 이 원인은 삭마로 인해 유동과 접하는 제트 베인 면적의 감소로 인한 것이다. 한편, 항력은 삭마상태가 심함에 따라 점점 커지는 것을 알 수 있고 편향각이 증가함에 따라 삭마의 영향은 줄어들는데, 이것은 편향각이 작을 때 선단부에 작용하는 정체 압력이 가장 크게 작용하기 때문으로 사료된다. 따라서 삭마상태에 따른 양항비는 양력이 감소하고 항력이 증가하기 때문에 크게 감소함을 알 수 있다.

제트 베인의 삭마상태에 따른 양력은 편향각 10° 에서 10%, 20% 삭마된 베인의 경우, 삭마되지 않은 베인의 91.6%, 84.4%로 성능 저하가 나타나며, 편향각 25° 에서는 각각 91.2%, 83.9%를

나타내었다. 이 결과로부터 삭마상태에 따른 양력특성은 삭마상태 및 편향각이 큰 경우 제트 베인에 작용하는 양력의 절대값은 감소하지만, 양력이 감소하는 비율은 유사하게 나타남을 보여준다.

한편, 삭마상태에 따라 제트 베인에 작용하는 항력 특성은 편향각 10° 일 때 10%, 20% 삭마된 제트 베인의 경우, 삭마되지 않은 베인의 116.8%, 137.8%이며, 편향각 25°에서는 각각 111.1%, 108.8% 증가를 나타내었다. 따라서, 항력은 삭마상태가 심하고 편향각이 작을 때 유동의 직접 접하는 정체면적이 넓게 나타나기 때문에 증가하고, 항력의 증가율은 편향각이 크고 삭마상태가 적은 경우 감소함을 알 수 있다.

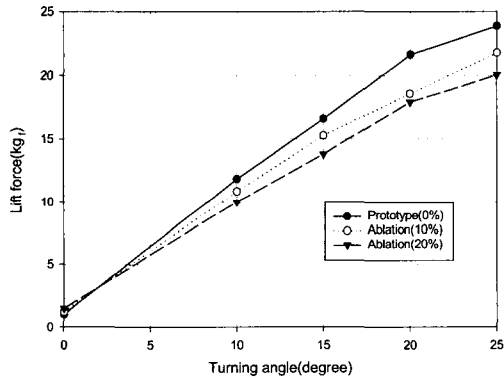


Fig. 11 Lift comparison of jet vanes with different ablated vanes

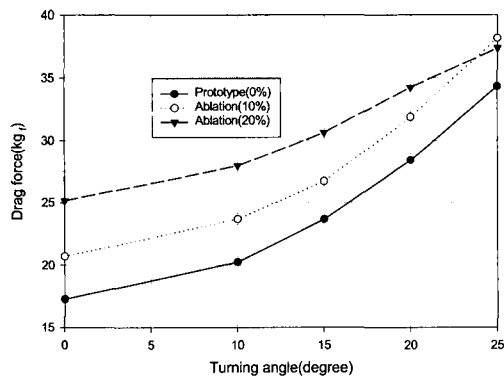


Fig. 12 Drag comparison of jet vanes with different ablated vanes

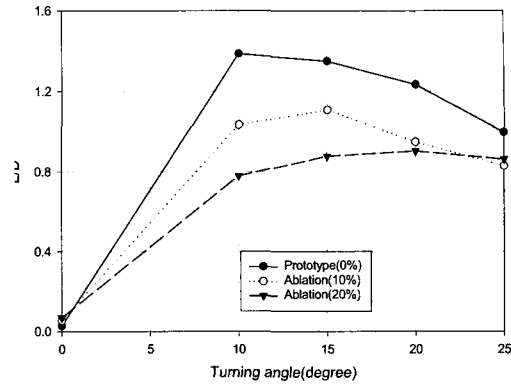


Fig. 13 L/D comparison of jet vanes with differently ablated vanes

또한, 제트 베인의 양항비 특성은 편향각 10°에서 10%, 20% 삭마된 베인의 경우, 삭마되지 않은 베인의 각각 77.4%, 56.0%이며, 편향각 25°에서는 각각 원형 베인의 83.1%, 86.5%를 나타내었다.

3. 결론

본 연구는 마하수 2.88, 과소 팽창비 2인 초음속 유동장치, 노즐 그리고 제트 베인을 설계, 제작하여 제트 베인의 선단부 형상과 종횡비 그리고 삭마율에 따른 공기역학적 특성을 실험적 결과를 바탕으로 분석해 보았으며, 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선단부 반경에 따른 양력 특성은 변화가 작고, 선단부 반경이 커짐에 따라 항력이 증가하여, 선단부 반경이 작을수록 양항비 특성이 좋게 나타난다. 따라서 선단부 반경을 크게 설계하면 항력 증가에 따른 추력손실로 인해 미사일의 사거리에는 짧아지나, 선단부 반경으로 인한 양력의 손실 없이 삭마가 잘 되지 않으므로 작동 시간을 늘릴 수 있다.

(2) 양항비에 대한 종횡비의 영향은 편향각 0°일 때는 나타나지 않으나 편향각이 충분히 클

때에는 종횡비가 작을 때 양항비가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 종횡비를 작게 설계해야 공기역학적 특성이 향상되는 것을 알 수 있다.

(3) 제트 베인의 작동 시간 중 삭마가 진행될수록 삭마상태가 심해짐으로 인해 제트 베인에 작용하는 양력은 작아지고 항력은 커지게 되어 양항비는 점점 작아지게 된다.

참 고 문 헌

1. Micheal J, Ripley-Lotee, Scott M. O'Neil, "jet Vane Thrust Vector Control-Neglected Technology with New Horizons", Naval Weapons Center, Code 2433, China Lake, CA 93555, 1979
2. Christopher P. Rahaim, Dr. Robert J. Cavalleri and John G. MCarthy, Dr. Alain J. Kassab, "Jet Vane Thrust Vector Control : A Design Effort", AIAA 96-2904, 1996
3. Michel A. Saad, Compressible Fluid Flow, Prentice-Hall, 1985
4. Yunus A. Cengel, Heat Transfer : A Practical Apaproach, McGraw-Hill, 1999