

제트베인 최적 설계를 위한 공기역학 특성 연구

신완순, 길경섭, 이택상, 박종호, 김윤곤*

The study of aerodynamic characteristics to design of optimum jetvane

W. S. Shin, K. S. Gil, T. S. Lee, J. H. Park, Y. G. Kim*

ABSTRACT

Thrust vector control system is control device which is mounted exit of the nozzle to generate pitch, yaw and roll directional force by deflecting flow direction of the supersonic jet from the nozzle. By obtaining control force, jetvane which is exposed in jet flow is working thermal and aerodynamic load. Axial thrust loss and side thrust is affected by shock patterns and interactions between jetvanes according to jetvane geometry and turning angle.

In this study, we designed 6 types of jetvane to evaluate pitch, yaw and roll characteristics of jetvane in supersonic flow, and perform the cold flow test in range of turning angles of jetvanes between 0° and 25° by 5° respectively. Also, calculation is going side by side to analyse flow interaction. Results show that there is no interactions between jetvanes upto turning angle 20° , chord and lead length ratio is very important parameter to aerodynamic performance and maximum thrust loss is appeared to 17% of axial thrust in roll directional control.

초 록

제트베인 추력편향장치는 노즐 뒤에 장착되어 노즐에서 분사되는 초음속 제트의 유동방향을 편향시킴으로써 하나의 노즐로 피치, 요, 롤 방향의 제어를 할 수 있는 장치이다. 제어력을 얻기 위해 초음속 유동중에 노출되어 있는 제트베인에는 열 및 공기역학적 하중이 작용하게 되며, 제트베인의 형상 및 편향각에 따라 나타나는 충격파 및 제트베인 상호 유동간섭으로 인해 비행 추력 손실 및 축력의 크기에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 마하 2.88 노즐 중에 놓인 제트베인의 피치 및 요, 롤 방향의 특성을 규명하기 위해 6종의 제트베인을 선정하고, 각 방향에 따른 제트베인 편향각 $0^\circ \sim 25^\circ$ 범위에서 5° 간격으로 유동시험을 각각 수행하였다. 또한, 유동해석을 병행하여 제트베인간의 유동 간섭 특성을 분석하였다. 연구 결과 제트베인간의 상호간섭은 나타나지 않으며, 제트베인의 공기역학적 특성은 현과 리드의 길이 비에 크게 좌우되고, 최대 추력손실은 롤 제어시 축추력의 17%로 나타났다.

* 충남대학교 기계공학과(Chungnam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1. 서론

현재 국내에서 개발중인 미사일 기술중 핵심 기술로 대두되고 있는 기술이 추력편향장치(Thrust Vector Control)이다. 이러한 추력편향장치에 대한 이용은 기존의 공력에 의한 방향 제어방법보다 신속한 비행 유도 제어를 할 수 있는 장치로 서방 선진국에서는 이미 개발을 완료하여 실전에 배치하고 있는 실정이다. 그러나, 국내에서는 아직 이론적 연구단계에 있으며 실제 설계자료가 미약한 상태임으로 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

추력편향장치는 노즐에서 분사되는 제트를 편향판에 의해 직접적인 방법으로 비행 방향을 바꾸어 비행체의 자세를 제어하는 장치로써 기존의 공력제어의 단점인 고 고도 비행이나 발사 초기단계의 저속비행시 제어력의 한계를 극복한 장치이다. 공력제어의 경우 속도의 2승에 비례하는 제어력을 가지고 있으나 양각이 큰 경우나 공기가 희박한 영역에서는 실속 현상이 발생하여 급격한 제어불능상태가 발생하며, 이에 초기 발사단계나 고고도 비행에서는 방향제어에 어려움이 발생한다. 그러나, 추력제어장치는 그 추력을 직접 제어함으로써 이러한 단점을 극복하여 최대 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 까지도 방향 제어할 수 있는 방향제어장치로써 원하는 최종 위치에 신속하게 도달할 수 있다.¹⁾

추력편향장치로는 여러 방법이 있으나 하나의 노즐로 피치(Pitch), 요(Yaw), 롤(Roll)의 3축 제어 가능하여 소형으로 가격 대 성능비가 우수한 제트 베인형 추력편향장치가 미사일 시스템에 많이 사용되고 있다. 또한, 이 방식은 베인이 직접 고온, 고속의 가스 흐름 내에서 작용하기 때문에 편향 추력 발생 측면에서 아주 우수한 장점을 가지고 있다.

추력편향장치는 전술미사일이나 로켓의 공중발사, 함대발사, 수중발사 미사일과 고 고도 자세제어에 사용되고 있다. TVC에 대한 개념은 1930년경 R. H. Goddard에 의한 것으로 2차 세

계 대전 중 독일의 V-2에 사용된 이후 Sergeant, Pershing, Corporal, Talos, Honest John, Wagtail, Beckett, Bomber Defence Missile과 같은 수많은 미사일 시스템에서 사용되었다.^{2) 3)}

이러한 연구는 1970년대부터 활발히 진행되어 Ayre⁴⁾는 제트 베인의 크기를 1/300로 축소하여 실험하여 그 결과를 실제 시험결과와 비교하였으며 Ripley-Lotte 등²⁾은 제트 베인의 재료 및 설계에 대해 언급하였으며 이를 토대로 계산결과와 실제 연소시험결과를 비교하였다. 최근에는 실험과 병행하여 수치적 계산을 수행하고 있으며 Unno 등¹⁾은 초음속제트중의 제트 베인 간섭특성에 대하여, R.P. Roger⁵⁾ 등은 편향각에 따른 항력 및 양력 특성에 대한 수치해석 연구를 수행한바 있다. 그러나, 이러한 선행 연구들은 대부분 기존에 사용되고 있거나, 1종의 제트 베인만을 이용한 실험 또는 해석결과로써 제트 베인의 추력편향장치의 유동분포나 열 하중으로 인한 재료 문제에 주로 관심을 두어 제트베인의 공기역학적 성능에 미치는 기하학적 형상 인자에 대한 연구는 수행되지 못했다.

따라서, 본 연구에서는 초음속유동시험장치에 공기역학적 특성을 고려하여 설계된 6종의 제트 베인을 이용, 제트 베인형 추력편향장치의 성능 시험을 수행하여 제트베인의 형상인자가 추력손실(Thrust loss) 및 측력(Side force)에 미치는 영향을 규명하고, 제트베인의 설계인자 자료 제시하고자 한다. 이를 위해 제트베인 6종의 편향각 $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 구간에서 5° 간격으로 변화시키 이때 발생하는 추력 및 측력을 측정하였으며, 유동 해석을 병행하여 실험결과와 비교 분석하여, 제트 베인의 표면 유동 및 제트 베인 간의 상호유동간섭 등을 규명하였다.

2. 유동해석

제트베인 추력편향장치는 초음속 제트중에 베인을 노출시켜 제트를 편향시키는 장치로써,

노출되어 있는 베인들은 편향각에 따라 다른 상호 유동간섭을 나타낸다. 이를 규명하기 위해서는 유동가시화 기법 및 베인 표면압력 측정 등이 수행되어야 하나 베인의 기하학적 형상 및 크기 제한이 있어 실험 연구로는 많은 어려움이 존재한다. 따라서, 제트베인 2종에 대한 유동해석을 병행하여 베인 표면 유동장 및 제트 베인 간의 유동 간섭 등을 규명하였다.

유동해석은 유한체적법의 상용 소프트웨어인 FLUENT™ ver. 5.3을 사용하여 열차폐대(Heat shield)를 제외한 노즐과 제트 베인을 고려하여 피치 및 요 방향의 거동을 고려하였으며, 베인의 편향각 0° , 10° , 20° 인 경우에 대하여 3차원 난류, 정상 유동으로 유동해석을 수행하였다. 난류 유동은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였다. 한편, 4축 제트베인 추력편향장치의 피치 및 요 거동시 상하부 또는 좌우 마주보는 베인이 동일한 각으로 편향되어 작동하므로 동일 편향각에서의 피치와 요 거동에 의한 유동장은 같은 분포를 나타내므로 해석에서는 요 방향만의 유동해석을 수행하였다. 또한, 요 거동시 상하부 베인만이 서로 같은 방향으로 편향되고 좌우 베인은 편향각 0° 를 유지하므로 격자는 상부만을 Fig. 1과 같이 생성하였다.

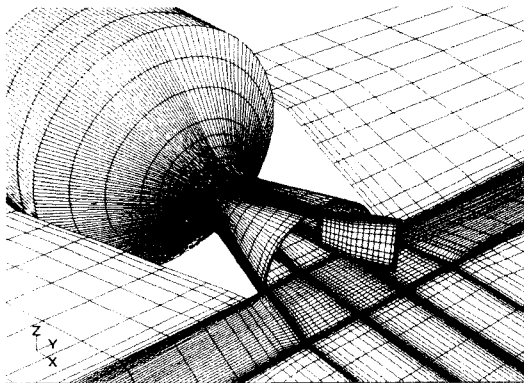


Fig. 1 Grid structure in iso view of computational domain for 20 deflection case

한편, 유동해석에서 기체는 공기로 가정하였으며, 점성계수는 Sutherland law를 이용하였고,

그 외 사용된 상수는 다음과 같다 $\gamma = 1.4$, $Pr = 0.7$, $k = 0.0242 (W/m \cdot K)$, $C_p = 1006.43 (J/kg \cdot K)$

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 초음속유동장치는 Fig. 2와 같이 공기압축기, 공기건조기, 저장용기, 압력조절기, 저압챔버와 노즐, 제트 베인 고정부, 그리고 제어패널로 구성되어 있으며, 고압압축기 및 건조기를 구동하여 저장용기에 고압의 기체를 저장용기에 충전하고 On-off 밸브를 이용, 순간에 분사시켜 노즐을 통과시킴으로써 초음속 유동을 모사한다. 노즐은 축소확산형으로 노즐 출구 마하수 2.88, 목지름 23.8mm, 출구지름 46.3mm 인 초음속노즐로 저압 챔버와 일체로 설치하였다.

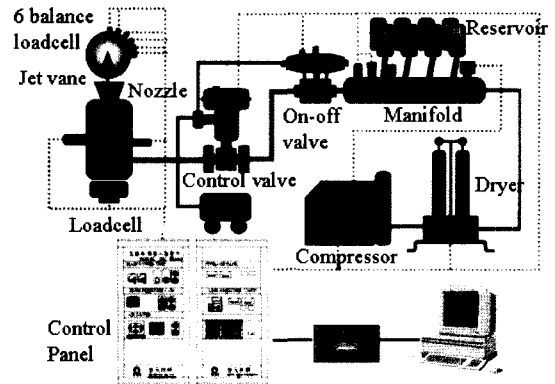


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

제트 베인의 형상은 사다리꼴 형상으로 Fig. 3과 같으며 6종의 설계치는 Table. 1에 나타내었다. 설계인자로는 제트 베인의 선단부 길이인 스패(Ls), 전체길이 현(Lc), 선단부 형상(R)과 선단면의 길이인 리드(Ll)로 구성된다.

제트 베인의 편향에 의한 추력 및 축력은 노즐 뒤에 설치된 6분력 로드셀(CAS MAS333-50 L)과 챔버 선단부에 1축 로드셀(CAS LS-2)을

설치하여 측정할 수 있도록 되어 있으며 저장용기와 저압챔버의 온도 및 압력은 K-Type 열전쌍과 $200 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 및 $100 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 의 압력센서(Sensys PMHB0100KAAB)를 이용하였다.

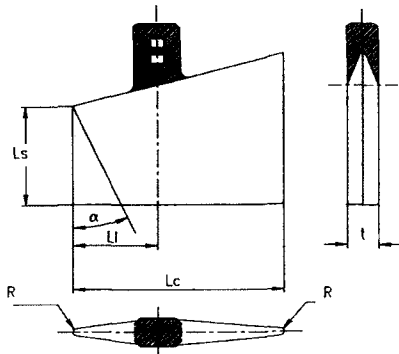


Fig. 3 Geometry of jetvane

Table 1. Specification of jetvane

No.	R(mm)	Ls(mm)	Lc(mm)	Lf(mm)
1	0.5	12.3	24.7	10.7
2	0.5	13.3	28.7	12.3
3	0.5	14.3	24.7	11.5
4	Rectangular	12.3	26.7	10.7
5	Rectangular	13.3	26.7	12.3
6	Rectangular	14.3	28.7	11.5

마하수 2.88, 과소팽창비 1.56인 초음속 유동을 모사하기 위해 저장용기에 $100 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 로 공기를 압축한 후, 일시적으로 분사하면 압력조절기를 통하여 저압챔버에 $48 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 의 정체 유동이 일정 시간동안 유지된다. 시험은 총 5초 동안 수행되며 실제 데이터 획득시간은 0.2초로 200개의 데이터를 수집하여 평균값을 취하였다. 6분력 로드셀에서 얻은 데이터는 교정시험으로부터 얻은 교정상수를 이용하여 각 방향에 작용하는 힘 및 모멘트의 상호간섭특성을 배제시켰다. 한편, 제트베인의 편향각은 $0^\circ \sim 25^\circ$ 구간에서 5° 간격으로, 피치 방향과 롤 방향에 대해서만 고려하여 시험을 수행하였다. 시험동안 형성되는 온도, 압력 및 추력 데이터는 엠프를 거쳐 데이터 획득 장치를 통해 PC로 획득하였다.

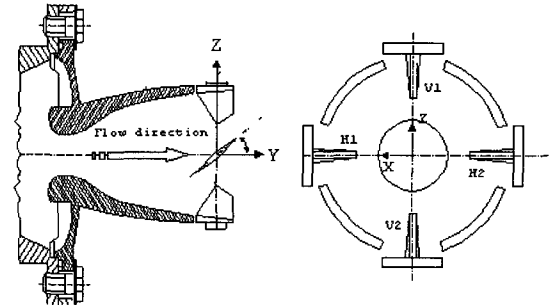


Fig. 4 Coordinate for jetvane system

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 좌표계를 나타내며, 유동방향을 y축, 유동방향의 수직방향을 z축, 그리고 수평방향을 x축, 그리고 베인이 축을 기준으로 시계방향으로 편향될 때의 각도를 '+'로 정의하였다. 피치 자세 제어시 H1, H2의 베인은 x축에 시계방향으로 편향되며 이때 각 베인에 작용하는 항력은 y 방향의 힘으로부터, 양력은 z 방향의 힘으로부터 측정된다.

4. 연구결과 및 고찰

Fig. 5는 유동해석을 통하여 얻은 노즐출구에서의 반경방향으로 밀도와 속도 분포를 나타낸 것으로, 노즐방향의 거리(r)는 노즐 출구반지름(r_0)로 무차원하여 나타내었다. 속도분포는 벽에서는 0, 노즐 중심 축에서 가장 큰 속도를 나타내나, 밀도는 노즐 중심 축 부분이 아닌 측면에서 최대값을 형성하였다. 이때 노즐 출구에서의 속도와 밀도의 평균값은 각각 591.3m/s , $5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 로 베인의 항력 및 양력계수 계산시 사용하였다.

Fig. 6은 베인 6번이 편향각 20° 로 피치 거동할 때 H2 베인의 표면 격자 상부에서의 마하수 분포를 나타낸다. 좌측면은 유동에 베인이 직접 노출되어 있어 경사충격파가 형성되기 때문에 선단면의 마하수가 감소하나, 리드를 지나면 변곡점에서 형성되는 팽창파에 의해 속도가 가속되고 있음을 나타낸다. 한편, 우측면의 유동 분포는 선단부에서 팽창파가 형성되어 속도가

가속되며 변곡점을 지나 유동 박리가 형성되어 재순환 유동에 의해 아음속 영역이 나타나고 있다.

Fig. 7은 5번 제트베인의 좌우 베인 H1, H2가 20° 편향된 경우의 마하수 분포로, 제트베인의 후단부 끝에서의 단면(x-z 평면)을 나타낸다. 출구마하수 2.88, 과소팽창비 1.56인 제트는 노즐 출구를 지나 연속적으로 팽창하여 베인 후단부에서 최대 마하수 3.85까지 가속되며, 베인 H1, H2의 상부면에는 마하수가 3.7까지, 베인 하부에는 아음속 유동 영역이 형성되고 있는데 Fig. 6에서 언급한바와 같이 후단부에서 유동 박리가 형성되었기 때문이다. 제트 경계면은 상하 및 좌우 베인의 바깥쪽에서 넓게 분포하고

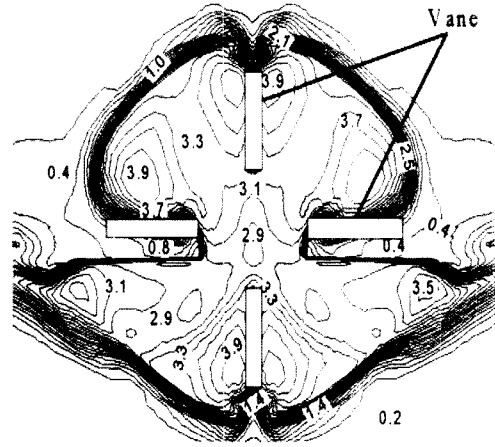


Fig. 7 Mach contour at plane of jetvane trailing edge

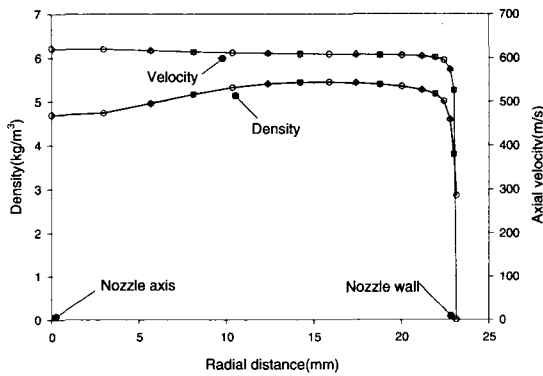


Fig. 5 Density and Velocity distribution at nozzle exit

있는데 이것은 해석에서 열차폐대를 고려하지 않았기 때문이다. 한편, 제트 베인간 사이의 유동마하수는 2.9~3.3 사이에서 균일하게 나타나, 베인에 의해 형성되는 충격파와 팽창파는 베인의 근접영역에서만 그 영향을 미치며 편향각 20°에서는 베인간 유동 상호간섭은 나타나지 않음을 알 수 있다. 제트베인 6번 해석결과에서도 동일한 결과를 나타내었다.

Fig. 8~10은 베인에 작용하는 공기역학적 특성을 규명하기 위해 피치 제어시 베인에 작용하는 각 방향의 힘으로부터 베인의 계수를 나타낸 것이다.⁹⁾

Fig. 8은 제트베인의 형상 및 편향각에 따른 항력계수를 나타낸 것으로 편향각이 증가하는 경우 항력의 크기도 급격히 증가하고 있다. 이 현상은 항력 특성이 편향각의 자승에 비례하여 나타나기 때문이다. 또한, 항력특성은 제트베인 3번이 가장 큰 항력계수를, 제트베인인 6번이 가장 작은 항력계수를 나타낸다. 이 결과로부터 선단부 반경이 크고 스패 및 리드의 길이가 현의 길이에 비해 긴 경우 베인의 항력특성이 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 베인의 양력계수를 나타낸 것으로 편향각에 따라 선형적인 증가 특성을 나타낸다. 양력특성은 선단부의 형상보다는 현의 길이와

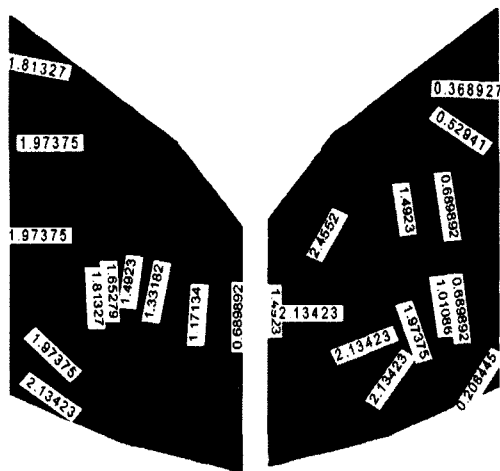


Fig. 6 Vane surface Mach No. contour

리드 길이의 비에 영향을 받는 것으로 나타났다. 리드의 길이가 현의 길이에 비해 긴 제트베인 5번의 양력 특성이 가장 우수하게 나타났다.

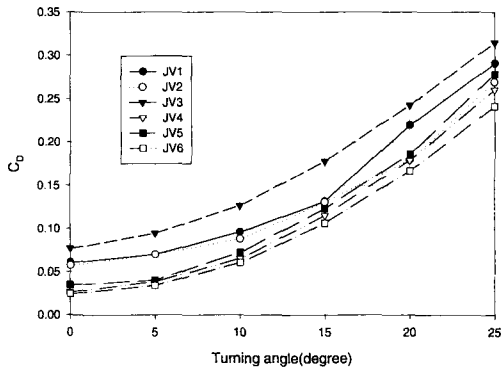


Fig. 8 Drag coefficient of jetvane

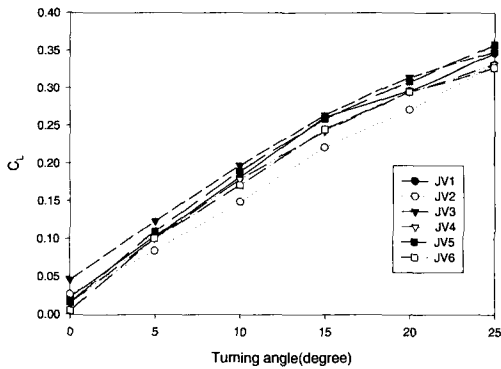


Fig. 9 Lift coefficient of jetvane

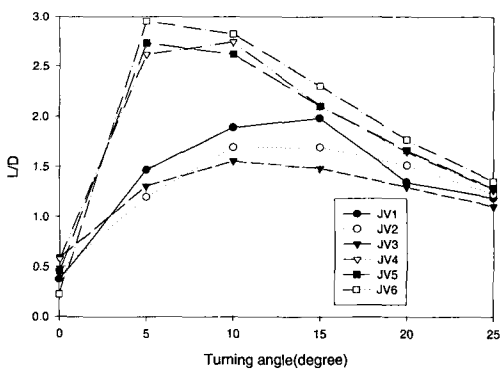


Fig. 10 Lift to drag ratio of jetvane according to turning angle

Fig. 10은 제트베인 6종의 양력대 항력비를 나타낸다. 제트베인의 형상은 양력보다는 항력의 크기에 더 민감하게 작용하여 양력대 항력비는 편향각 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 에서 최대값을 나타내며 선단부 형상이 사각인 베인의 경우 10° , 선단부 형상이 R0.5인 경우 15° 이 후에 감소한다. 이 결과로 제트베인 선단부의 형상이 사각이고, 현의 길이에 비해 리드의 길이가 긴 제트베인 6번이 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 11은 제트베인에 의해 롤 제어시 발생하는 유동 시험 결과를 나타낸 것이다. 각 제트베인의 롤 특성은 편향각에 따라 선형적으로 증가하는 형태를 나타내어, 양력특성과 유사한 결과를 나타낸다. 제트베인 단면적이 가장 큰 6번이 가장 높은 롤 제어력을 나타내었다.

제트베인의 피치 및 롤 거동시 베인에 형성되는 항력에서 기인된 추력손실은 Fig. 12~13에 나타내었다. 유효추력은 제트베인이 없는 경우와 장착된 경우 각각 형성되는 축 추력과 추력손실의 차를 축추력의 비로써 나타낸 것이다. 유효추력은 제트베인의 항력 특성에 따라 나타나기 때문에 롤 거동시에 피치 거동시보다 더 큰 추력손실이 작용하는 것을 나타낸다. 이러한 현상은 롤 거동시 4개의 베인이 모두 작용하기 때문에 베인이 2개 작동하는 피칭 거동시보다 25° 에서 약 1.4배 큰 추력손실이 발생한다. 롤에 의한 최대 추력손실은 선단부의 형상이 원형이며, 현의 길이에 비해 스패ن 길이가 길어 항력이 크게 작용되는 제트베인 3번이 0° 에서 5.4%, 25° 에서 17%를 각각 나타내었다.

Fig. 14는 제트베인 6번에 대하여 유동해석을 통하여 얻은 예측치와 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로 베인에 작용하는 각 방향의 힘은 해석 격자점에서의 베인 표면 압력과 각 방향의 면적을 적분하여 계산한 값이다. 편향각에 따라 양력 및 항력은 열차폐대를 고려하지 않았음에

도 불구하고 실험결과와 잘 일치하였다.

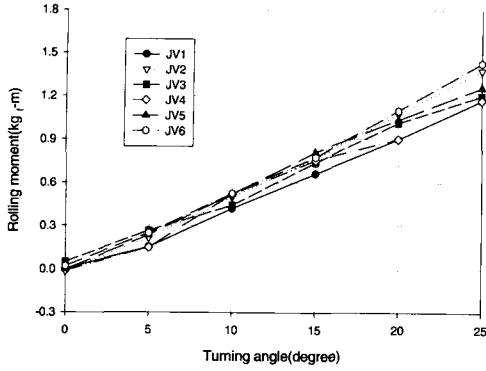


Fig. 11 Roll moment of jetvane according to turning angle

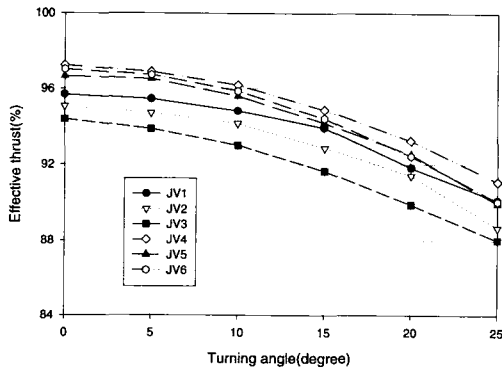


Fig. 12 Effective thrust due to pitch control of jetvane

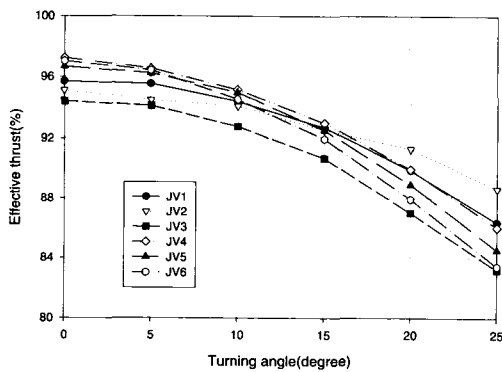
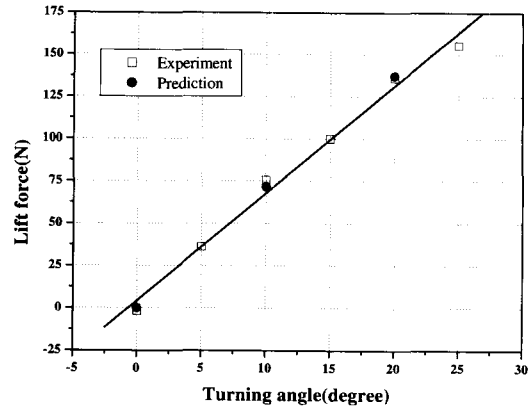
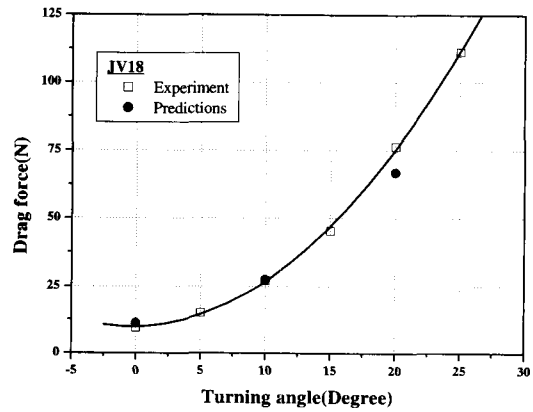


Fig. 13 Effective thrust due to roll control of jetvane



(a) Lift force according to turning angle



(b) Drag force according to turning angle

Fig. 14 Comparison of experimental data and prediction of Jetvane No. 6

5. 결론

초음속유동장치를 이용한, 6종의 제트베인의 형상 및 편향각에 따른 제트베인의 공기역학적 특성 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2중 제트베인의 유동해석 결과로 편향각 20° 이하에서의 베인 간의 상호 유동간섭은 나타나지 않으며, 예측치는 실험 결과와 일치하였

다.

2. 제트 베인의 공기역학적 특성은 선단부 형상 및 현과 리드의 길이에 큰 영향을 받으며, 선단부의 형상이 사각인 경우, 현의 길이에 비해 리드의 길이가 긴 제트 베인 6번의 양력대항력비가 크게 나타났다.

3. 롤 모멘트는 편향각에 따라 선형적으로 증가하고, 단면적이 가장 큰 제트 베인 6번이 가장 큰 롤 모멘트를 나타내었으며, 롤 및 피치 제어시 형성되는 최대 추력 손실은 제트베인 3번의 경우 편향각 25° 에서 각각 17%, 10%이다.

참고문헌

1. Masaru Unno, A. Koichi Hayashi, Toshi Fujiwara, Masaru Kodama, and Kazuo Arashi, "超音速噴流中のジェットベーンにより生じた衝撃波の干渉", 平成 5年度 衝撃波シンポジウム講演會文集 pp. 523~526. 1993.
2. 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.
3. Christopher P. Rahaim, Robert J. Cavalleri, John G. McCarthy, and Alain J. Kassab, "Jet Vane Thrust Vector Control : A Design Effort", AIAA 96-2904, 1996.
4. V. H. Ayre, "Analysis and Experiments on Jet Vane Thrust Vector Control", Technical Report No. RG-73-4, Feb. 1973.
5. R. P. Roger, S. C. Chan, and J. D. Hunley, "CFD Analysis for the lift and drag on a fin/mount used as a jet vane TVC for boost control", AIAA-95-0083
6. Michel A. Saad, "Compressible Fluid Flow", Prentice-Hall, 1985.
7. Alan Pope and Kenneth L. Goin , "High-Speed Wind Tunnel" John Wiley & Sons, New York, 1965
8. R. H. Nunn and M. D. Kelleher , "Jet Vane Heat Transfer Modeling", Naval Postgraduate School , AD A 175340, 1986.
9. Pakrad A. Giragosian, "Experimental simulation of a Rocket Exhaust Control System", AIAA 89-2328