

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.2.034>

Shroud의 영향에 따른 제트 베인의 공기역학적 특성 연구

박순종* · 박종호**†

The Study of Aerodynamic Characteristics of Jet-Vane Affected by the Shroud

Soonjong Park* · Jongho Park**†

ABSTRACT

Thrust vector control system is a control device which is mounted on the exit of the nozzle to generate pitch, yaw and roll directional force by deflecting flow direction of the supersonic jet from the nozzle. Thermal and aerodynamic loads are acting on the surface of jet vane when it is exposed to the jet flow. Axial thrust loss and side thrust loss are affected by shock patterns and interactions between jet-vanes which varies with jet-vane geometry and turning angle. In this research, the performance estimation using the numerical simulation analysis of the nozzle is given and the investigation of the flow visualization and aerodynamic performance with the enforced power to the vane is taken.

초 록

추력편향장치는 일반적으로 노즐 뒤에 장착되어 추진기관에서 분사되는 초음속 제트의 유동방향 자체를 편향시킴으로 단일 추진체의 노즐에서 종축, 횡축, 회전축 방향의 제어를 할 수 있다. 노즐 유동장내에 노출되어 있는 편향장치인 제트 베인의 경우 그 형상과 편향각도에 따라서 상호 유동 간섭에 의한 추력손실이 발생되게 된다. 본 연구에서는 실험에 사용된 노즐의 수치해석과 더불어 제트 베인 각도 변화에 따른 공기역학적 유동가시화를 수행하였으며 베인에 미치는 유동간섭의 특징을 분석하였다.

Key Words: Thrust Vector Control(추력 방향 조종), Jet-Vane(제트 베인)

1. 서 론

세계적으로 비행체 자세제어 기술에서 보편적

으로 사용되는 기술로써 형상 및 비행체 표면에 부착된 날개를 이용한 공력제어방식이 현재까지 주로 이용되었다. 최근 들어 고고도 및 발사초기 자세 제어를 위해 Thrust Vector Control(추력 방향 조종)을 응용하여 직접적으로 추진기관의 추력 방향을 제어하는 방식이 개발, 발전되어 적용되고 있다[1]. 최근 국내에서도 개발되고 적용

접수일 2010. 11. 3, 수정완료일 2012. 3. 12, 게재확정일 2012. 3. 17

* 정희원, 충남대학교 대학원 기계공학과

** 종신회원, 충남대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jhpark@cnu.ac.kr

되고 있으나 추진체 소모 후 제트 베인 구조물에 의해 추력방향의 흐름을 방해하는 원인분석에 대한 연구가 필요하다[2, 3].

본 연구에서는 발사체의 비행방향 제어방식 중 차세대 비행체의 추력 방향 조종 기술의 이해와 발사체 개발 등에 유용한 Shroud가 감싼 형태의 일체형 제트 베인을 제작하여 특성을 시험하였다. Shrouded Jet-Vane의 경우 하나의 노즐로 종축(pitch), 횡축(yaw), 회전축(roll)의 3축 제어가 가능하며, 소형으로 단축분리도 가능하게 설계되었으며 베인 파트가 노즐에 직접 삽입되어 일체화된 구조이다[4].

따라서 Shroud 유무에 따른 명확한 유동간섭 특징의 규명을 위해 일체형 제트 베인을 최적형상으로 제작하여 시험하였으며, 쉐리렌 장치를 이용한 유동가시화 및 베인에 작용하는 측력을 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험장치

제트 베인 특성 시험을 위한 초음속 유동장치의 경우 Fig. 1과 같이 가압장치, 고압 저장용기, On-Off 밸브, 압력제어 밸브, 챔버, 그리고 노즐로 구성되어 있다. 가압시스템은 고압 압축기와 건조기로 구성되어 있으며, 압축기는 최대 토출 압력 350 kgf/cm²이며, 압축 형식은 왕복동식이고 송출량은 475 l/min 이다. 저장용기는 허용

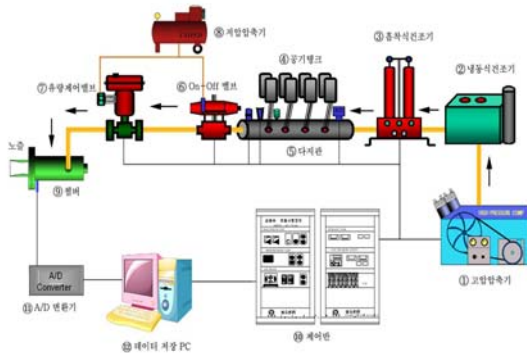


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

압력이 150 Kg_f/cm²인 체적 68 l의 고압 공기탱크 16개와 450 l의 대용량 공기탱크 2개가 병렬로 연결되어 있다. 또한 허용압력이 200 kg_f/cm²인 체적 76 l의 다지관(Manifold)으로 이루어져 있다. 초음속 유동 시험 장치에 있어서 중요한 부분은 실제와 유사한 제트가 형성되도록 노즐 설계 시 충분히 반영되고, 고압 저장용기의 설계에 있어서 최대 허용압력을 고려하여 작동압력과 용량을 결정하여야 한다. 본 연구에서 사용된 계측장비로는 압력센서(Sensys, 0.25% FS/FS)와 실험을 위해 설계 제작된 6축 로드셀(CAS MAS, 100 kg_f 최대, 3% FS/FS)을 이용하여 작용하는 힘과 모멘트를 A/D board(NI-M201)를 이용하여 컴퓨터에 저장 및 분석하였다. 이 때 각 채널당 sampling 수는 센서의 응답성을 고려하여 초당 10 kHz로 충분하게 설정하였으며 시험시간의 경우 약 5.5~8.5 초로 하였다.

Figure 2에서는 시험 노즐의 실질적인 마하수 측정을 위해 초음속 피토관의 쉐리렌 사진을 보여주고 있다.

횡축으로 총 3개의 피토관으로 구성되어 반복 실험을 통해 오차율을 ±0.2 kg_f/cm² 이내로 줄이고 스트레인게이지 방식의 압력센서로 AD 변환기를 통해 3 kHz로 PC에 저장하여 검증하였다. 노즐 중심축을 기준으로 제트 풀름내에서 균일한 속도장이 형성되는지를 확인하기 위해 피토관을 사용해서 노즐 출구로부터 측방향 50 mm 까지 10 mm 간격으로 측정하였으며 설계된 마하

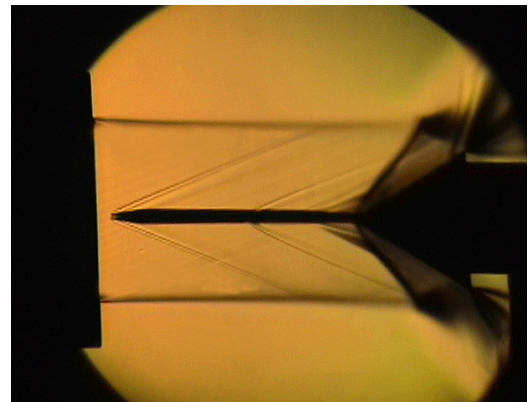


Fig. 2 Schlieren photograph of supersonic pitot tube

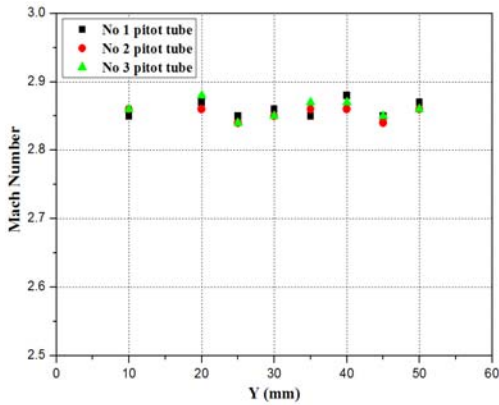


Fig. 3 Mach number distribution at the correct expansion state

수 2.86에 충분히 만족함을 알 수 있었다. 측정에서 얻어진 값은 Fig. 3에 그래프로 도시하였다.

2.2 시험시간

시험시간의 경우 실제적인 성능시험을 통해 얻을 수 있지만 이론적인 해석방법으로도 예측이 가능하다. 유동모사 과정동안 저장용기(reservoir)에서 챔버로 이동하는 공기의 이송과정을 등 엔트로피 과정으로 가정할 때 다음 식으로부터 시험시간이 계산된다. 여기서, p_f 는 관마찰손실을 고려한 챔버압력, p_i 는 노즐목면적, p_i , T_i 는 저장용기의 초기압력 및 온도, p_i 는 파이프 손실을 고려한 저장용기의 압력, V 는 저장용기의 체적을 나타낸다.

$$t = 0.0353 \frac{V}{A_t} \cdot \frac{\sqrt{T_i}}{T_i} \cdot \frac{p_i}{p_t} \left\{ 1 - \left(\frac{p_f}{p_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\} \quad (1)$$

$$\dot{m} = 0.04042 \frac{p_i}{\sqrt{T_i}} A_t \quad (2)$$

Figure 4에서 보면 두 식을 이용하여 시험에서 사용되는 마하수 2.86 노즐에 대한 예상 시험시간을 도시하였다. 그래프에서 관 손실이 없을 경우 9.6초, 25%의 손실이 있을 경우 8.2초, 50%의 손실이 있을 경우 6.8초의 수치적인 값으로 예상

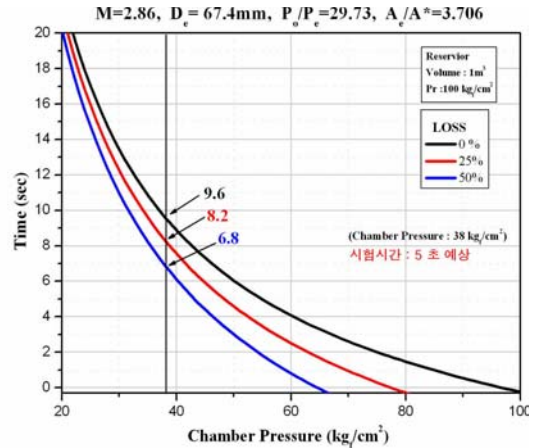


Fig. 4 Test time with various chamber pressure

할 수 있었다. 시험에서 원활한 반응시간을 고려한 실제 적용된 전체 시험시간은 약 5.5 ~ 8.5초로 센서의 반응시간(rising time)을 제거한 실질적인 취득 시간은 약 2.8 ~ 3.1초 정도이다.

2.3 시험모델 및 방법

시험모델의 경우 제트 베인 기저부, 지지대, 제트 베인등 총 3개로 조합되게 구성되어 있는데 베인이 실질적으로 체결되는 제트 베인 기저부(base)는 제트 베인과 일체화가 가능하게 설계하였으며 shroud 내면에 완전히 삽입된 구조로써 노즐유동에는 직접적인 영향은 미치지 않도록 설계되었다. 본 연구에 앞서 수행된 제트 베인의 실험에서 취득된 결과를 이용하여 새로운 타입의 shroud가 포함된 제트 베인을 제작하였다[5].

Figure 5에서 좌측 상단의 지지대가 Shroud가 없는 경우시험에 사용된 모델이고 우측 상단의 사진이 Shroud를 포함한 모델이다. 하단 좌측은 제트 베인 결합체를 보여주며 우측 하단의 경우 제트 베인과 결합되는 제트 베인 기저부(Base)다.

Figure 6에서는 시험에 사용된 제트 베인의 형상을 보여주며 리드길이는 12.6 mm, 스펠 길이는 20.33 mm, 시위는 29.66 mm, 두께는 5.33 mm이다.

4개 1조로 제작된 제트 베인은 초음속 유동장치의 노즐출구에 놓인 제트 베인 지지부에 편향

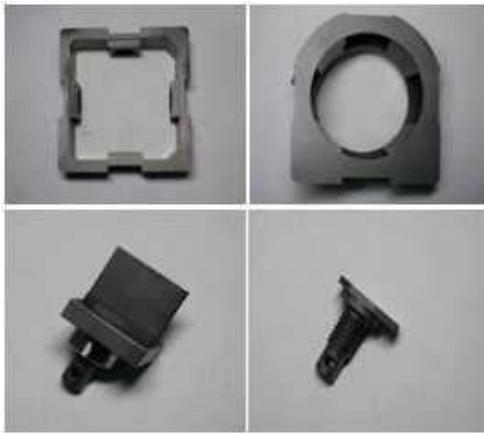


Fig. 5 Photograph of test model

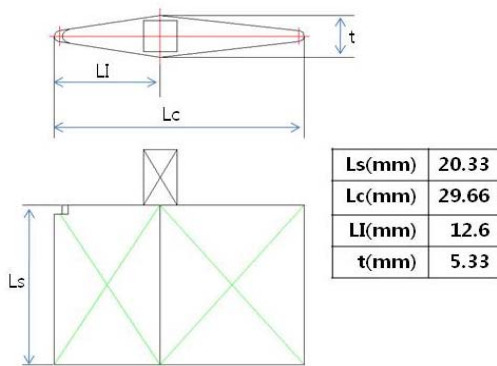


Fig. 6 Dimensional design of jet vane

각에 따라 설치한 후 종축 및 횡축, 그리고 회전축 방향의 힘을 측정하였으며 제트 베인의 지지부는 실질적으로 고정 역할을 해줄 수 있게 제작하여 시험을 수행하였다.

Figure 7의 경우 베인을 고정하는 지지대와 시험에 사용된 제트 베인 모델의 구성을 나타내고 있으며 X-Y-Z 방향의 구성을 보여주고 있다. 시험조건에서 Z축 방향으로 유동을 편향시키기도록 H1과 H2 베인을 시계방향으로 회전시키면서 실험을 수행하였다.

제트 베인의 편향각은 각각의 제트 베인에 대해 0°~30° 구간을 ±5° 간격으로 변화시키면서 각각 5회씩 반복실험 하였으며 얻어진 값을 평균하여 결과를 분석하였다. 실제 시험에서의 조건을 간략히 Table 1에서 보여주고 있다.

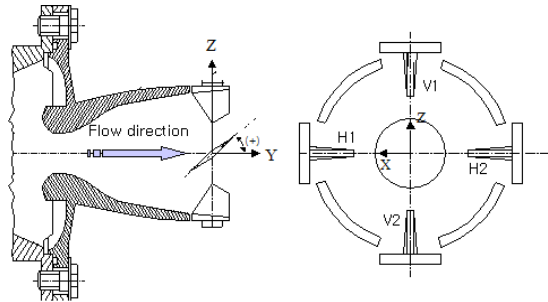


Fig. 7 Coordinate for the jet-vane test system

Table 1. Test condition

Mach Number	Chamber Pressure (kg/cm ²)	Control Valve Opening(%)	Test Time(s)	Data Acquisition(s)
2.86	29.7 ~ 30	100	5.5 ~ 8.5	0.8

3. 결과 및 고찰

3.1 유동가시화

출구 마하수 2.86의 초음속 노즐유동 중에 종축(pitch), 횡축(yaw), 회전축(roll) 방향으로 작용하는 Shroud형 제트 베인의 후류의 유동특성을 관찰하기 위해 편향각 0°를 기준으로 ±30° 범위에서 5° 간격으로 실험을 하였고 변화의 폭이 실질적으로 판별되는 +10° 간격의 조건에 대한 가시화 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

편향각 0°인 경우로서 제트 베인의 뒷전에 형성되는 두개의 경사충격파가 선명히 나타나며, 이 경사충격파와 노즐유동과 만나서 생성되는 여러 형태의 반사충격파가 격자 구조로 복잡하게 나타난다. 시험에 사용된 쉘리렌 시스템의 경우 공기 중 밀도 분포에 따른 영향에 따라 가시화하는 장비로 실질적으로는 평면상의 2차원 구조의 분석으로 사용되기에 사진에서의 격자 그물형태로 유동장 구조가 겹쳐서 나타난다.

과소팽창 노즐 유동의 경우 팽창팬을 지나 배압과 제트의 경계를 이루는 제트경계면을 형성하고 제트 경계면의 하류로 갈수록 그 경사가 작아지면서 유동 축 방향으로 오므라드는 구조

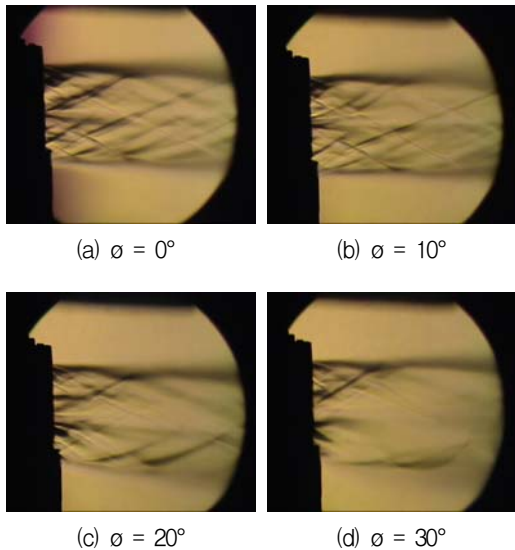


Fig. 8 Schlieren photographs of jet deflection

를 보이나 Shroud의 간섭과 제트 베인에 따른 유동 간섭이 노즐의 제트 유동방향과 혼합되어 노즐출구 방향으로 그물형태와 유사하게 진행됨을 알 수 있었다. Fig. 8(b)의 편향각 10°에서는 제트 베인 뒷전의 상부에서 충격파가 하부에서는 팽창파가 형성되며 편향각 0°인 경우보다 제트는 하부로 다소 편향되나 거의 유사한 형태의 모습이며, 균일하지 않은 충격파 형상으로 보아 충격파의 유동간섭이 발생하는 것으로 생각된다.

한편 Fig. 8(c)의 편향각 20°인 경우에서 보면 10°일 때보다 급격하게 하부로 편향됨을 보여주고 있다. 이는 제트 베인 앞전하부에 형성되는 충격파의 영향으로 유동박리가 발생되어 충격파가 하부로 유입되면서 제트 베인 후방에서 마하수의 가속에 의한 팽창파가 발생되었기 때문이라 생각된다.

Figure 8(d)의 30°의 경우에는 베인 자체의 급격한 기울기에 의해 제트내의 충격파의 유동 구조자체가 붕괴됨을 알 수 있었고, 하부제트 경계면은 편향각에 따라 편향됨을 보여주고 있으나, 상부 제트 경계면은 이와 관계없이 진행됨을 미루어 보아 제트 베인에 의한 추력방향제어에 설계값에 따른 한계가 존재함을 의미하는 것으로 판단되며 각도 변경에 따른 실질적인 변화가

있음을 확인하였다. 다양한 각도에서의 편향시험에서 볼 수 있듯이 제트 베인 선단부를 지나 하단부로 갈수록 증가된 마하수에 의해 발생한 충격파가 형성되고 있었으며, 상부에서 형성되는 충격파는 제트 베인 상부 뒷면에서 형성되는 유동박리에 따른 경계층에서의 발달된 충격파로 판단된다.

3.2 특성시험

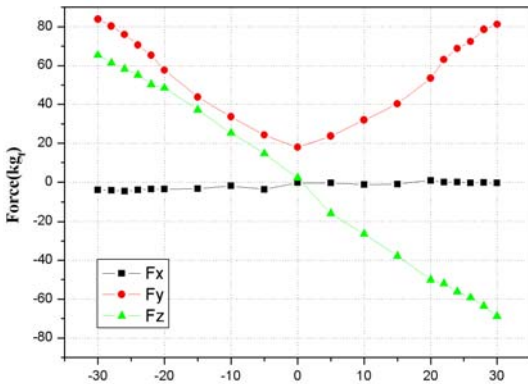
시험에 사용된 출구 마하수 2.86 노즐을 통하여 과소 팽창비 1.3인 유동중에 5° 간격으로 종축방향의 편향각에 따라 회전시키고 20° 이후부터는 미세한 분석을 위하여 2° 간격으로 실험을 하여 6분력 로드셀은 각 방향으로 작용되는 힘과 모멘트를, 1축 로드셀은 추력을 측정하여 Shroud의 영향에 따른 제트 베인 추력 방향 조종 장치의 측력 및 추력손실을 알아보았다.

Figure 9는 편향각에 따라 종축 제어일 경우 X, Y, Z 방향으로 작용하는 힘을 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 shroud가 없는 경우이고 (b)는 shroud가 있는 경우이다. 그래프에서 얻어진 시험 결과는 각 조건에 따라 5회 반복과정을 통해 측정된 평균값으로 도시하였다.

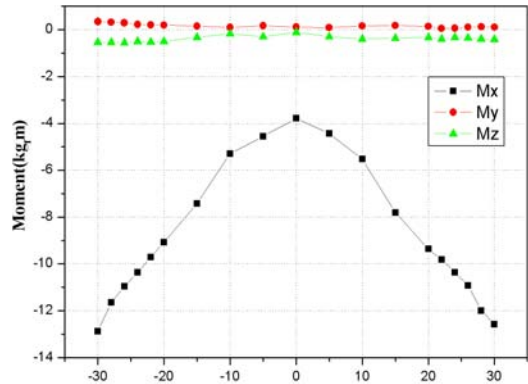
제트 베인의 편향각을 동일한 각으로 변화시키에 따라 X방향의 힘은 0 kgf에 근접하여 나타나고 실질적인 제트유동의 방향인 Y방향으로는 편향각이 증가함에 따라 0°를 중심으로 좌우 대칭형의 V형 분포를 보여준다. 이는 shroud의 유·무를 떠나서 편향각의 절대치가 커짐에 따라 유동과 수직으로 접하는 면적이 증가하기에 작용하는 힘도 균일하게 증가하는 경향을 보여주고 있다.

그러나 shroud가 있을 경우 편향각이 20°가 넘어가면서부터 Z방향으로의 힘은 감소됨을 보여주었는데 이와 같은 현상은 shroud 자체와 노즐 압축과, 그리고 제트 베인과 상호 간섭에 따른 중첩영역이 존재하여 비선형적으로 증가하는 것으로 판단된다.

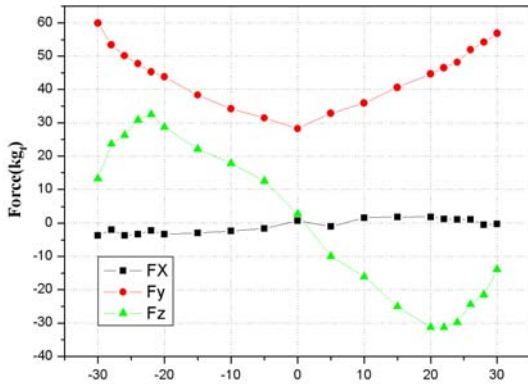
한편 Fig. 10은 동일한 조건에서 shroud의 유무에 따른 종축 제어 시 각 방향에 따라 발생하는 모멘트의 특성을 나타내었다. Y 및 Z축 모멘



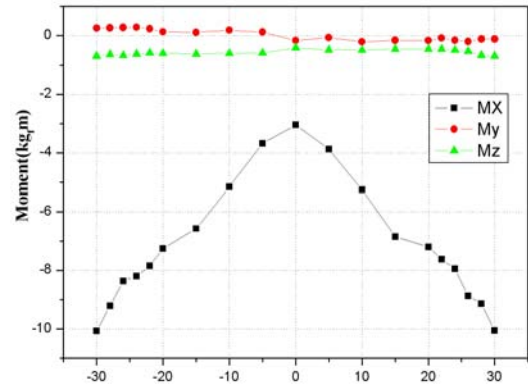
(a) jet vane without shroud



(a) jet vane without shroud



(b) jet vane with shroud



(b) jet vane with shroud

Fig. 9 Directional force under pitch control of jet vane

Fig. 10 Directional moment under pitch control of jet vane

트의 경우 좌우의 베인이 동일한 편향각을 갖기에 좌우대칭 구조를 이루어 0 kg.m에 가까운 근사값을 확인하였다.

그러나 X축에 대한 모멘트 값의 경우 편향각 0°를 중심으로 좌우대칭형의 측정값을 보여주며 이는 편향각이 커짐에 따라 형성되는 하중에 비례하여 동일하게 증가함을 알 수 있었다. 또한 실험을 통해 측정된 계측값은 shroud가 있을 경우 shroud 영향에 따른 베인간의 간섭에 의해 전반적으로 감소됨을 알 수 있었다.

Figure 11은 Shroud의 존재 유무와 편향각 변화에 따라 측력 및 측력을 나타내었다. 제트 베인에 작용하는 항력(F_D) 및 양력(F_L)을 형상에 따른 특성을 배제하기 위하여 노즐출구에서의 동

압과 각 제트 베인의 면적으로 무차원하여 항력 계수(C_D)와 양력계수(C_L)을 구할 수 있다. 여기서 A(투영면적), ρ (밀도), V_e (노즐출구속도)이다.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A V_e^2} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A V_e^2} \quad (4)$$

편향각이 증가됨에 따라 항력 및 양력의 크기도 비례하여 급격히 증가하고 있음을 보여주고 있다. 단, Shroud가 없는 경우에는 모두가 선형

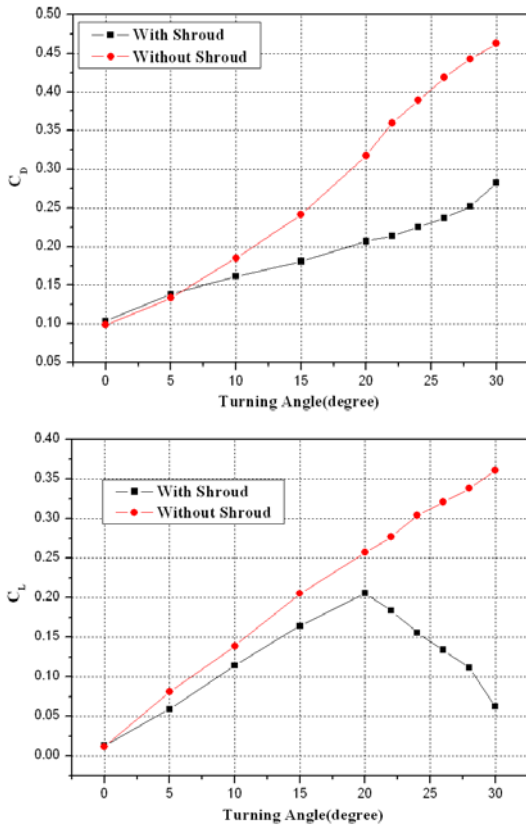


Fig. 11 Drag and Lift coefficient of jet-vane according to turning angle

적인 증가현상을 보여주는 반면 Shroud가 있을 경우에는 없는 경우보다 항력의 경우 적은 기울기 값으로 상승되고 양력의 경우 20°까지는 동일한 상승을 보이다가 그 이상의 편향각에서 오히려 감소되는 경향을 알 수 있었다.

베인에 의해 발생된 충격파는 노즐내 유동방향에 대하여 편향되게 위치하면 유동방향의 면(windward)에는 경사충격파가 발생하여 압력을 증가시키며, 유동이 지나가는 반대면(leeward)에는 팽창파를 생성하여 압력이 감소되는 현상이 있다. 이런 베인의 양면에서 발생하는 압력차를 이용하여 측력을 얻게 되는데 Shroud가 없을 경우 편향각의 변화에 따라 선형적인 결과값을 보여주나 Shroud가 존재하는 경우 베인과 대칭되는 베인사이에 중첩되는 구간이 발생하여 압력은 더욱 상승되는 것으로 확인된다. 본 연구에서

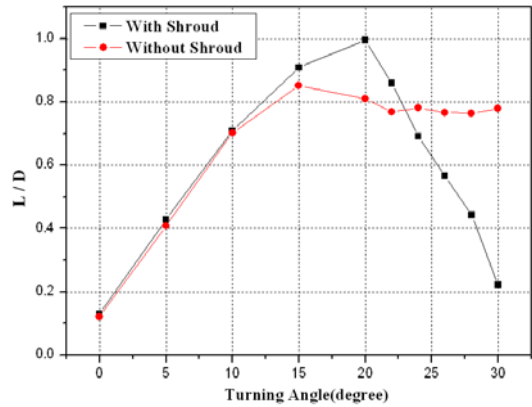


Fig. 12 Lift to drag ratio of jet-vane according to turning angle

는 편향각 20° 이후부터 변화가 나타나고 측력의 손실이 커짐을 Fig. 12에서 알 수 있었다.

Figure 12는 Shroud의 유·무에 따라 제트 베인 성능의 중요한 지표가 되는 양항비를 나타낸 것으로 노즐출구에서의 동압과 각 제트 베인이 차지하는 면적으로 무차원화하여 항력계수 및 양력계수를 취득하였다. 시험에서 베인 편향각 15°까지는 선형적인 상승의 경향을 보여주나 20° 부근에서 상호 차등이 있음을 확인하였다. Shroud가 없는 경우는 주 유동인 노즐유동의 후류에 위치하여 결과적으로는 각도변화에 따라 일정한 증가를 나타내며 20° 이후에도 유지되는 반면, shroud가 존재하는 경우 20°까지 비슷한 양항비를 보이다 20° 이상의 편향각에서 감소되는 현상을 보여준다.

4. 결 론

Shroud의 영향에 따른 비교분석을 위해 스펀 길이 20.33 mm, 리드길이 12.6 mm, 두께 5.33 mm로 설계된 제트 베인을 제작하여 얻어진 시험결과와 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모멘트의 경우 종축 및 횡축 제어 시 편향각의 변화에 따라 Shroud의 영향에 관계없이 동일한 경향을 알 수 있었다.

2. 종축 및 횡축 제어 시 발생하는 측력은 편향각에 따라 증가하지만 shroud가 존재할 경우 측력은 최대 20°까지 상승 후 감소되었다.
3. Shroud가 없을 경우 노즐유동의 후류에 베인 결합체가 위치하기에 편향각에 따라 측력의 경우 선형성을 가지고 있으나 Shroud가 있는 경우 비선형적인 특성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Faupell, L. C., Wassom, S. R. and Klinger, J. J., "Vectorable Nozzle Having Jet Vanes," U.S. Patent No. 5,511,745, Apr. 1996
2. Stallings, Jr., R. L. and Lamb, M., "Wing-alone Aerodynamic Characteristics for High Angle of Attack at Supersonic Speeds," NASA TP-1889, 1981
3. Rahaim, C. P., Cavalleri, R. J, McCarthy, J.G., Kassab, A. J., "Jet Vane Thust Vector Control: A Design Effort," AIAA 96-2904, 1996
4. 성홍계, 황용석, "Shrouds로 감싸있는 제트 베인의 측력 특성," 한국항공우주공학회지, 제30권, 제4호, 2002, pp.84-91
5. 신완순, 길경섭, 이택상, 박종호, 김윤곤, "제트 베인 최적 설계를 위한 공기역학 특성 연구," 한국추진공학회지, 제5권, 제1호, 2001, pp.26-33