

노즐 설치각에 따른 초음속 터빈 익렬의 유동 특성에 대한 실험적 연구

조종재* · 정수인* · 김귀순** · 박창규***

An Experimental Study on the Flow Characteristics of a Supersonic Turbine Cascade as Nozzle Installation Angle

Jong-Jae Cho* · Soo-In Jeong* · Kui-Soon Kim** · Chang-Kyu Park***

ABSTRACT

In this paper, a small supersonic wind tunnel is designed and built to study the flow characteristics of a supersonic impulse turbine cascade. The flow is visualized by means of a single pass Schlieren system. The supersonic cascade with 3-dimensional supersonic nozzle was tested over a wide range of nozzle installation angle. Highly complicated flow patterns including shocks, nozzle-cascade interaction and shock boundary layer interactions are observed.

초 록

본 연구에서는 초음속 충동형 터빈 익렬의 유동특성을 알아보기 위해 소형 초음속 풍동을 설계하였으며 Single pass Schlieren system을 이용하여 유동을 가시화하였다. 실험은 3차원 초음속 노즐과 익렬을 조합하여 노즐 설치각에 따라 실시하였다. 실험을 통해 충격파를 포함한 복잡한 유동 형태와 노즐-익렬, 충격파-경계층 상호작용 등을 관찰할 수 있었다.

Key Words: Supersonic(초음속), Cascade(익렬), Visualization(가시화), Schlieren(슐리렌), Shock(충격파), Shadowgraph(쉐도우그래프)

1. 서 론

우주 발사체 또는 유도 무기용 액체 추진 로켓의 필수 구성요소인 추진제 공급시스템은 대부분의 경우 고압 터보 펌프 방식을 적용하고 있다. 선진국에서는 이미 고압 터보 펌프가 많이 사용되고 있으나 액체 추진 로켓의 개발 경

† 2004년 4월 27일 접수 ~ 2004년 11월 25일 심사완료

* 학생회원, 부산대학교 항공우주공학과

** 중신회원, 부산대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 국방과학연구소 3체-1-6

연락처, E-mail: spacecho@pusan.ac.kr

힘이 없는 국내에서는 소형위성 발사체(KSLV-I) 사업을 진행하면서부터 고압 터보 펌프에 대한 본격적인 개발에 착수하였다. 이러한 펌프를 구동하는 터빈은 낮은 효율에도 불구하고 소형, 경량이면서 높은 출력을 낼 수 있는 초음속 터빈이 주로 사용된다. 일반 축류 터빈에 대해서는 실험적, 수치적 방법으로 그 동안 많은 연구가 수행되어 그 성능이나 유동 특성에 대한 자료가 많이 알려져 있다. 하지만 초음속 터빈의 유동 특성에 대한 연구는 C. D. Colclough[1,2], B. S. Stratford[3,4] 등에 의해 수행되어졌으나 그 수가 적을 뿐만 아니라 초음속 터빈 사용 분야의 특수성으로 인해 공개 또한 쉽게 되지 않고 있다. 또한 초음속 터빈은 초음속 유동영역에 작동을 하며 더구나 부분 흡입방식을 채택하여 기존의 터빈과는 완전히 다른 유동특성을 가지게 되므로 이러한 조건에서는 터빈의 성능 예측과 설계가 힘들거나, 신뢰도 역시 아주 많이 떨어지고 있는 실정이다. 그리고 초음속 터빈은 충격파의 발생 여부에 따라 성능이 급격하게 변하며 그 오차가 매우 크다.

Nomenclature

φ	: Nozzle installation angle
λ	: Nozzle exit flow angle
A_{th}	: Nozzle throat area
A_{exit}	: Nozzle exit area
\dot{m}	: Mass flow rate
T_{00}	: Nozzle inlet total temperature
P_{00}	: Nozzle inlet total pressure
P_1	: Nozzle exit static pressure
PR	: Nozzle pressure ratio (P_{00}/P_1)

따라서 보다 높은 효율의 초음속 터빈을 설계하기 위해서는 먼저 많은 실험과 해석을 통해 실질적인 초음속 터빈내의 유동특성을 규명하여 신뢰할만한 자료를 충분히 확보해야만 한다.

본 연구에서는 실험을 통하여 터빈 성능 변수

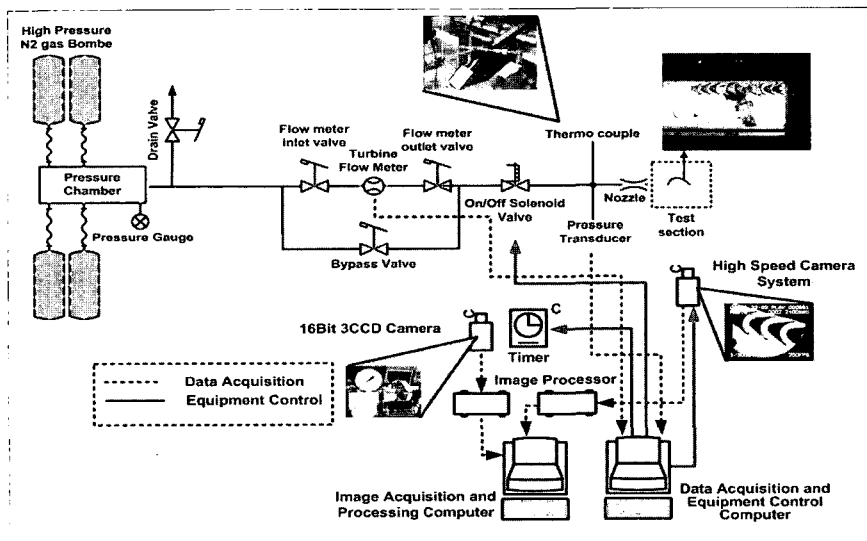


Fig. 1 Schematic of experimental control and measurement setup

중의 하나인 노즐 설치각을 변화시키면서 그에 따른 초음속 터빈내의 유동특성과 그 변화를 알아보았다. 그리고 실험을 위해 소형의 초음속 풍동을 설계·제작하였으며, 슬리덴 시스템을 이용하여 초음속 유동을 가시화하였다. 실험은 3차원 초음속 노즐과 터빈 익렬을 조합하여 실시하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

2.1.1 실험장치

본 실험을 위해 설계한 초음속 풍동의 전체적인 개략도는 Fig. 1과 같으며 실험장치는 작동유체인 질소를 채운 충전압력이 1500 psi, 부피가 42 liter인 고압질소용기 4개와 압력 챔버(pressure chamber), On/Off 슬레노이드 밸브 그리고 시험부(test section)로 구성되어 있다.

실험에 사용된 노즐은 Fig. 2와 같이 코어(core)의 형태로 되어 있으며, 수축-확장 노즐을 사용하였다. 형상은 Fig. 3과 같이 노즐 확산부 반각 9° , 노즐 목직경 2.5 mm, 출구 직경 7.6 mm이며 노즐 면적비(A_{exit}/A_{th})는 9.24이다. 노즐은 Fig. 4와 같이 노즐 고정틀(nozzle adapter)에 결합하여 사용하도록 제작되었으며 노즐 설치각을 바꾸기 위해 노즐 고정틀을 3가지 각도(18.78° , 21.89° , 26.14°)로 제작하였다.

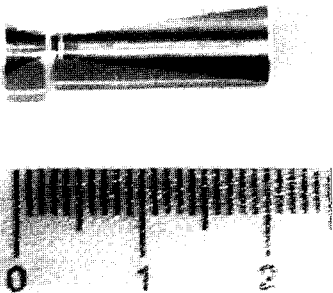


Fig. 2 Nozzle core and cross section

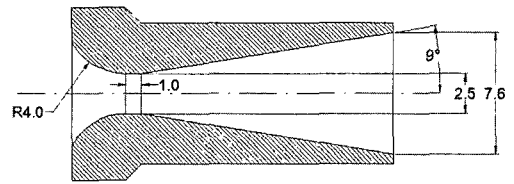


Fig. 3 Nozzle profile

Figure 5는 실험에 사용된 블레이드이며 형상은 Fig. 6과 같다. Chord 길이 14.06 mm, pitch 9.56 mm, 블레이드 각(χ) 25.34° 이며 설치각(installation angle)은 90° 이다.

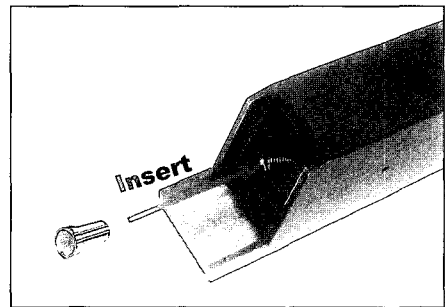


Fig. 4 Nozzle and adapter assembly

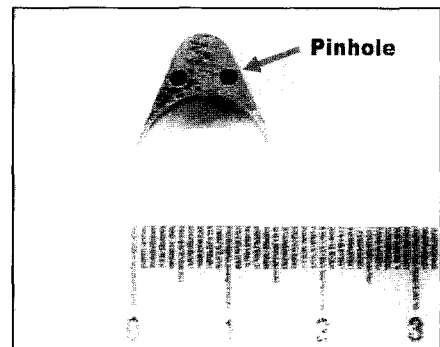


Fig. 5 Blade configuration

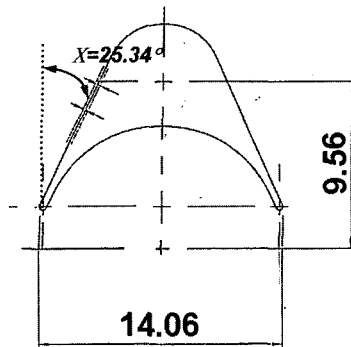


Fig. 6 Blade profile

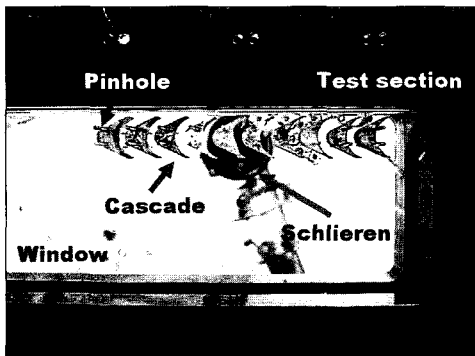


Fig. 7 Test section

블레이드는 Fig. 7와 같이 두 개의 핀홀(pinhole)을 이용하여 시험부에 장착하였다. 시험부에는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 슐리렌을 이용하여 유동을 가시화하기 위해 투명 창을 설치하였으며 선명한 유동 가시화 영상을 얻기 위해 석영유리로 제작을 하였다.

2.1.2 실험과정 및 데이터 획득

본 실험의 모든 과정은 실험 프로그램에 의해 제어되며 실험은 On/Off 솔레노이드 밸브를 닫은 후, 고압질소를 압력 챔버에 채운 다음, 실험 프로그램을 작동시켜 On/Off 솔레노이드 밸브가 열리면서 시작된다. 실험시간은 경우에 따라 틀리나 대략 5~10초 정도이다. 실험의 시작과 동시에 터빈 질량유량과 노즐 입구 정압력, 노즐 입구 전온도가 각각 터빈 유량계(Flow technology Inc.,

LN-5-C-V1-9), 압력 변환기(Kulite, BME-1100-2500SG-A-4) 그리고 열전대(Omega, C01-K)에 의해 측정되어지며, 측정된 데이터는 DAQ Board를 통해 실시간으로 컴퓨터에 저장된다. 실험장치 제어 및 측정 개략도는 Fig. 1에 잘 나타나있다.

2.1.3 유동 가시화 및 영상 획득

본 연구에서는 초음속 터빈 유동가시화를 위해 Schlieren system을 이용하였다. Shadowgraph 영상을 획득하기 위해 Single mirror Schlieren system을 사용하였다.

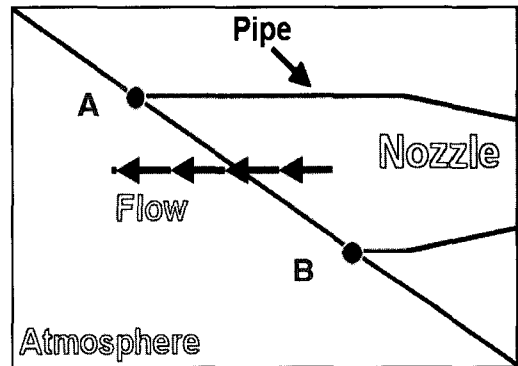


Fig. 8 Nozzle cross section geometry

그리고 Schlieren 영상을 얻기 위해 Z-type Schlieren system을 사용하였다. 광원으로는 150W 텅스텐 연속광을 사용하였으며 가시화된 영상을 획득하기 위해 3CCD 디지털 카메라(Panasonic, DC330)와 고속카메라 시스템(Kodak, SR Ultra-C)을 사용하였다. 획득된 영상은 광학 필터로 보정을 하여 영상 처리 컴퓨터에 의해 디지털 영상으로 변환시켜 저장했으며, 카메라는 데이터 획득 및 장치제어 컴퓨터에 연결되어 실험의 시작과 동시에 작동된다.

2.2 실험결과 및 고찰

노즐 입구에서 압력 변환기에 의해 정압력이 측정된다. 이 측정된 정압력을 등엔트로피 관계식을 이용한 계산 결과 노즐 입구에서의 속도가

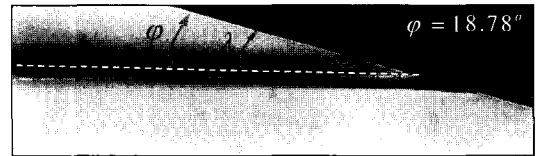
$M \approx 0.03$ 으로 아주 작게 나왔다. 따라서 정압력과 전압력의 차이가 거의 없는 것으로 생각하고 압력 변환기에서 측정된 정압력을 전압력으로 가정하여 실험을 실시하였다.

2.2.1 노즐 유동

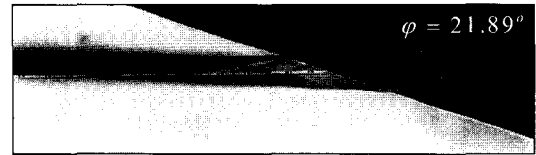
노즐 설치각에 따른 터빈 익렬 유동 가시화 실험을 실시하기 전에 먼저 노즐 유동 가시화를 실시하였다. 실험은 Fig. 8과 같이 노즐 유동을 대기 중으로 쏘는 방법으로 실시하였으며 Fig. 9(a) ~ (c)는 실험을 통한 Schlieren 가시화 영상이다. 흰색 점선은 노즐의 위치와 노즐 출구 중심선을 나타내는 것으로 오른쪽 상단의 검은 영역은 노즐 고정틀 부분이다.

Figure 9(a)은 φ 가 18.78° 일 때의 유동 가시화 영상으로 " λ "는 노즐 출구 유동각을 나타내며 " φ "는 노즐 설치각을 나타낸다. Fig. 9(a)의 가시화 영상을 통해 노즐에서 발생된 충격파들을 관찰할 수 있으며 출구로부터 나온 충격파들이 다이아몬드 형상을 보이면서 유동 후류로 반사되어 나가는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8의 A위치에 해당하는 부분에서 경사 충격파가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 A와 B위치에서 유동이 수축되는 형상을 보이는 데 이것은 과대팽창(over-expansion)시 A와 B위치에서 발생한 경사충격파를 지나면서 노즐 출구 내부의 압력을 노즐 출구 배압과 맞추기 위해 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 또한 λ 가 φ 보다 작은 것을 볼 수 있는데 이것은 먼저 대기에 노출되는 B의 위치에서 경사충격파로 인해 유동이 안쪽으로 굽어지면서 발생하는 현상이다. Fig. 9(b)는 φ 가 21.89° 일 때의 유동 가시화 영상으로 노즐에서 발생된 충격파의 형상은 Fig. 9(a)와 유사하며 λ 와 φ 사이의 각이 Fig. 9(a)보다 작아졌다는 것을 알 수 있다. Fig. 9(c)는 φ 가 26.14° 일 때의 유동 가시화 영상으로 노즐에서 발생된 충격파의 형상 역시 Fig. 9(a)와 유사하며 λ 와 φ 사이의 각이 Fig. 9(b)보다 작아졌다는 것을 알 수 있다.

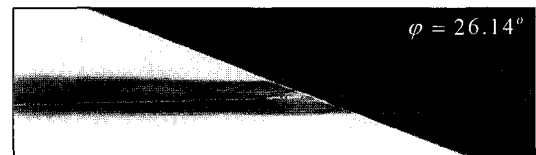
Figure 10을 통해 관찰할 수 있듯이 φ 가 커질수록 φ 와 λ 사이의 각 차이가 점차 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이것은 φ 가 커짐에 따라 노즐 출구 유동에 영향을 주는 외부로 노출된 노즐 출구 면적이 점차 줄어들어 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 이것은 완전팽창 상태가 아닐 경우 노즐 출구 유동각(λ)이 변할 수 있다는 것을 나타낸다.



(a) $\varphi = 18.78^\circ$, $P_{00} \approx 1000 \text{ psi}$, $T_{00} \approx 295 \text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79 \text{ g/sec}$



(b) $\varphi = 21.89^\circ$, $P_{00} \approx 1000 \text{ psi}$, $T_{00} \approx 293 \text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79 \text{ g/sec}$



(c) $\varphi = 26.14^\circ$, $P_{00} \approx 1000 \text{ psi}$, $T_{00} \approx 292 \text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79 \text{ g/sec}$

Fig. 9 Nozzle flow as nozzle installation angle(Degree), Schlieren image



Fig. 10 Nozzle flow deflection as nozzle installation angle(Degree), Schlieren image

2.2.2 익렬 유동

노즐 설치각에 따른 터빈익렬 유동 특성을 알아보기 위해 Fig. 10과 같은 방법으로 노즐 설치각을 바꾸어 가면서 실험을 실시하였다.

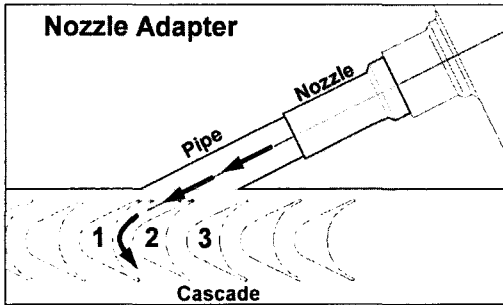


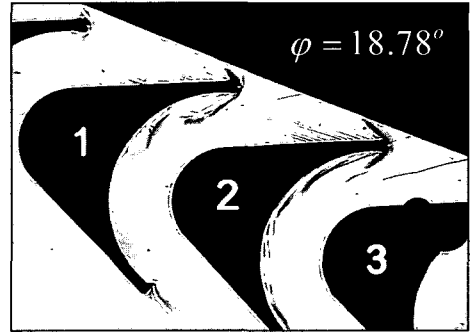
Fig. 11 Schematic of cascade experiment

Figure 12(a) ~ (c)는 노즐 설치각에 따른 터빈 익렬 유동 가시화 사진으로 Shadowgraph 영상이며 오른쪽 윗부분의 검게 보이는 곳은 노즐 고정틀이다.

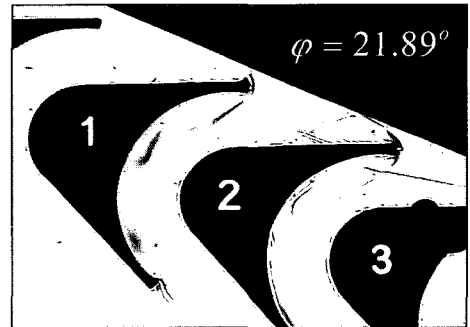
본 실험에서는 블레이드 각(χ)과 유동 입사각(λ)이 같을 때를 "0" 입사각이라고 가정하였다. 따라서 Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)는 (+)입사각을 가지고 Fig. 12(c)는 거의 "0" 입사각을 갖는다고 볼 수 있다.

Figure 12(a)는 φ 가 18.78° 이고 (+)입사각일 때의 가시화 영상으로 1번과 2번 블레이드 앞전(Leading edge)에서 Bluntness에 의한 Detached shock이 발생함을 볼 수 있으며 Detached shock 부분이 검게 퍼져 보이는 것은 실험에 사용된 노즐이 3차원 노즐이기 때문에 노즐 출구의 유동이 균일하지 않아 발생하는 것으로 생각이 된다. 그리고 1번 블레이드 뒷전에서 Fish tail shock이 발생하는 것을 볼 수 있으며 익렬 앞전 영역에서 노즐 내부로부터 전파된 충격파들을 관찰할 수 있다. 2번 블레이드 앞전 근처 흡입면에서 발생하는 압축파와 같은 형상은 블레이드와 시험부 창 사이의 틈에서 발생하는 누설 유동 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 2번 블레이드 흡입면 Axial chord 40%지점에서 유동 박리가 나타나는 것을 어렵듯이 관찰할 수 있다. 유동장 영역은 인

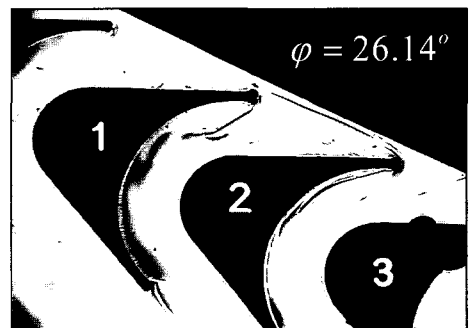
접 블레이드(0번) 유로와 1번과 2번 블레이드 사이의 유로, 그리고 2번과 3번 블레이드 사이의 유로에 걸쳐 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a) $\varphi = 18.78^\circ$, $P_{00} \approx 1000\psi$, $T_{00} \approx 296\text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79\text{ g/sec}$



(b) $\varphi = 21.89^\circ$, $P_{00} \approx 1000\text{ psi}$, $T_{00} \approx 295\text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79\text{ g/sec}$



(c) $\varphi = 26.14^\circ$, $P_{00} \approx 1000\text{ psi}$, $T_{00} \approx 294\text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79\text{ g/sec}$

Fig. 12 Turbine cascade flow as nozzle installation angle(Degree), Shadowgraph image

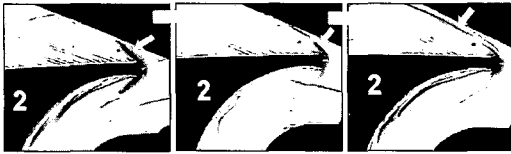


Fig. 13 Variation of detached shock on the 2nd blade leading edge as nozzle installation angle

Figure 12(b)는 φ 가 21.89° 이고 (+)입사각일 때의 유동 가시화 영상으로 전체적인 유동 특성은 Fig. 12(a)와 유사하다. 2번 블레이드 앞전에 발생된 Detached shock의 각도가 Fig. 12(a)보다 작아졌음을 볼 수 있다. Fig. 12(c)는 φ 가 26.14° 이고 "0" 입사각에 근접한 유동 가시화 영상으로 전체적인 유동 특성은 Fig. 12(a)와 유사하며, 2번 블레이드 앞전에 발생된 Detached shock의 각도가 Fig. 12(b)보다 작아졌음을 볼 수 있다.

Figure 13을 통해 설치각(φ)이 증가함에 따라 터빈 입사각이 감소하여 2번 블레이드 앞전에 나타나는 Detached shock의 각도가 점차 작아지는 것을 알 수 있다.

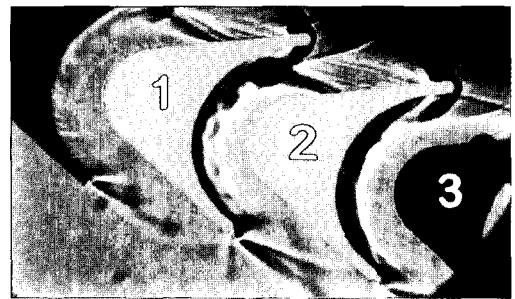
2.2.3 익렬 유동 박리

터빈 익렬 유동 박리 가시화 실험은 노즐 설치각에 따른 유동 박리 영역의 변화를 좀더 확연하게 관찰하고자 실시하였다. 실험은 Fig. 10과 같은 방법으로 카메라의 조리개 수치를 키우고 Schlieren system 광원의 세기와 노출시간을 줄여 실시하였다.

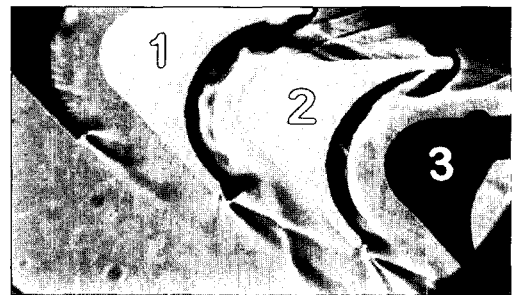
Figure 14(a)는 φ 가 18.78° 이고 (+)입사각일 때의 Shadowgraph 영상으로 2번 블레이드 흡입면 Axial chord 40%지점에서 유동 박리가 관찰되며 1번 블레이드 앞전 Detached shock아랫부분과 2번 블레이드 흡입면의 유동 박리가 만나 유동이 꼬이는 듯한 형상을 보이며, 터빈 익렬의 앞전 부분에서 노즐 유동 영역을 볼 수 있다. Fig. 14(b)는 φ 가 21.89° 이고 (+)입사각일 때 Shadowgraph 영상으로 2번 블레이드 흡입면 axial chord 40%지점에서 유동 박리가 관찰되며 박리영역은 Fig. 14(a)보다 약간 줄어들었음을 알 수 있다. Fig. 14(c)는 φ 가 26.14° 이고 "0"

입사각에 근접한 Shadowgraph 영상으로 역시 2번 블레이드 흡입면 Axial chord 40%지점에서 유동 박리가 관찰되며 박리영역은 Fig. 14(b)보다 약간 줄어들었음을 알 수 있다.

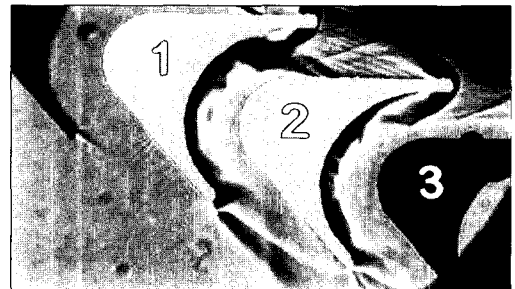
Figure 14(a) ~ (c)의 유동가시화 영상을 통해 노즐 설치각(φ)이 커짐에 따라 유동 박리 영역이 줄어드는 경향을 보이지만 그 변화는 미미하며 유동 박리 지점 또한 거의 변화가 없음을 알 수 있다.



(a) $\varphi = 18.78^\circ$, $P_{00} \approx 1000 \text{ psi}$, $T_{00} \approx 298 \text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79 \text{ g/sec}$



(b) $\varphi = 21.89^\circ$, $P_{00} \approx 1000 \text{ psi}$, $T_{00} \approx 298 \text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79 \text{ g/sec}$



(c) $\varphi = 26.14^\circ$, $P_{00} \approx 1000 \text{ psi}$, $T_{00} \approx 298 \text{ K}$
 $\dot{m} \approx 79 \text{ g/sec}$

Fig. 14 Turbine cascade flow separation as nozzle installation angle(Degree), Shadowgraph image

3. 결 론

본 연구에서는 초음속 터빈 익렬의 유동 특성을 관찰하기 위해 소형 초음속 풍동을 제작하여 노즐 설치각(φ)에 따른 터빈 익렬의 유동을 가시화하였으며 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 부분 입사형 터빈의 경우 노즐 출구가 비스듬하게 절단되기 때문에 수직으로 절단된 노즐과는 다른 유동 특성을 나타낸다.
- 2) 본 실험 조건에서는 노즐이 과팽창되어 노즐 설치각보다 노즐 출구 유동각(λ)이 더 작아짐을 볼 수 있었다.
- 3) 노즐 설치각(φ)이 커질수록 노즐 출구 단면적이 작아져 노즐 설치각(φ)과 노즐 출구 유동각(λ) 사이의 차이가 점차 작아짐을 볼 수 있었다.
- 4) 노즐에서 발생한 충격파가 터빈 유로내로 전파되는 것을 볼 수 있었다.
- 5) 노즐 설치각(φ)이 커질수록 블레이드 앞면에 발생하는 Detached shock의 각이 작아짐을 볼 수 있었다.
- 6) 노즐 설치각(φ)이 커질수록 터빈 유동 박리 영역은 줄어드는 경향을 보이나 그 정도가 작고 박리 위치 또한 거의 변화가 없음을 볼 수 있었다.

노즐 설치각 변화에 따른 초음속 노즐과 터빈 익렬 내부의 유동특성과 그 변화를 고찰한 본

연구의 결과는 초음속 노즐과 터빈 익렬 내부의 유동특성 이해에 대한 참고자료와 전산코드의 검증용 자료로써 사용될 수 있다고 생각된다. 그리고 초음속 터빈 설계시 노즐 설치각 변화에 따른 터빈 익렬 내부 유동특성 변화에 대한 고려가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Colclough, C. D., "Design of turbine blades suitable for supersonic relative inlet velocities and the investigation of their performance in cascades: part I theory and design," Journal of mechanical engineering science, Vol. 8 No. 1, 1966
2. Colclough, C. D., "Design of turbine blades suitable for supersonic relative inlet velocities and the investigation of their performance in cascades: part II experiments, results and discussion," Journal of mechanical engineering science, Vol. 8 No. 2, 1966
3. Stratford, B. S. and Sansome, G. E., "Tunnel tests on a double cascade to determine the interaction between the rotor and the nozzles of a supersonic turbine," N.G.T.E. M 359, 1962
4. Stratford, B. S. and Sansome, G. E., "Theory and tunnel tests of rotor blades for supersonic turbines," R&M 3275, 1965