

회전부를 장착한 터빈 시험장비 개발

박응식* · 송성진** · 홍용식**

Development of a Rotating Turbine Test Rig

Eung-Sik Park*, Seung-Jin Song**, Yong-Shik Hong**

Key Words: Turbine(터빈), Annular Cascade(환상형 캐스케이드), Rotating Facility(회전 실험장치)

ABSTRACT

To investigate turbine flow fields under realistic conditions, a rotating turbine test facility has been developed at the Inha University Propulsion Laboratory. The experimental facility consists of an air inlet, settling chamber, single turbine stage test section, and diffuser. This turbine has a design flow coefficient of 0.55 and work coefficient of 1.88. The turbine test rig has four features. First, a large scale test section improves space resolution. Second, low speed rpm enhances safety and reduces required power. Third, DC motor/generator is able to regenerate blower power. Fourth, various types of experiment can be carried out.

1. 서 론

가스터빈의 연구가 대두된 이래 블레이드 내에서의 유동을 해석하기 위한 기본적인 이론에서부터 손실의 해석과 이의 감소를 통한 가스터빈 엔진의 성능향상을 위해 많은 실험연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁾

이러한 실험에 사용되는 풍동에는 현재 선형 캐스케이드(linear cascade), 부분 환상형 캐스케이드(partial annular cascade) 그리고 완전 환상형 캐스케이드(full annular cascade) 등이 있다.

과거에는 장비구성의 용이성과 완전 환상형 캐스케이드의 개발의 어려움, 개발비용 등의 이유

로 인해 선형 캐스케이드를 주로 이용했고 이로써 어느 정도 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이는 기본적인 2차원 효과는 나타낼 수 있으나 3차원 및 비정상 효과는 보여주지 못한다. 선형이나 부분 환상형 캐스케이드의 한계성은 다음과 같다.⁽²⁾ 첫째, 터빈 블레이드들중의 일부분만을 장착한 실험을 실시하기 때문에 이러한 경향성이 전체 터빈의 특성을 나타낸다고 단정지을 수 없다. 둘째, 수축부를 지난 흐름이 전환부를 거쳐 시험부로 유입되는 과정에서 입구흐름이 전환부 벽면의 영향에 의하여 흐름의 불균일성을 발생시킬 수 있다. 셋째, 시험부를 지나 후방으로 배출되는 흐름을 유도하는 디퓨저의 설계와 제작이 용이하지 못하다. 부분 환상형 캐스케이드에 임의의 후방 디퓨저를 설치

* 인하대학교 항공우주공학과 대학원

** 인하대학교 항공우주공학과

하여 시험을 한 결과 손실이 감소함을 알 수 있다.⁽²⁾ 따라서 보다 정확한 터빈 블레이드의 실험 자료를 획득하기 위해서는 실제 터빈형상과 거의 유사한 형태의 완전 환상형 캐스케이드 실험을 필요로 하게된다.

1995년, 국내에서는 최초로 본 연구실에서 완전 환상형 캐스케이드를 이용하여 터빈 정익 통로내에 분리판(splitter vanes)을 통한 이차흐름 조절에 관한 실험연구가 진행되었다.⁽³⁾ 그러나 이는 정익(stator)만을 장착하였고 회전부가 없는 것으로서 이 완전 환상형 정익 캐스케이드로는 실제 터빈의 회전익에서 발생하는 흐름을 정확하게 모사할 수 없었고 실제 동익(rotor)을 장착한 터빈 실험장비는 현재 국내 대학교에는 전무한 상태이다. 때문에 본 연구실에서는 보다 신뢰성있는 연구를 위해 직접 완전 환상형 정익-동익 풍동을 설계, 제작하였다. 본 논문은 이 실험장비의 구성과 특징에 대하여 설명을 하고자 한다.

2. 실험장치구성

본 실험장치는 1995년에 인하대학교 항공공학과 분사추진실험실에 설치되었던 완전 환상형 캐스케이드 풍동에 동익(rotor)부분을 추가로 장착하여 개조하였다. 장치구성은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 크게 공기 흡입구와 정체부, 시험부, 전·후방 디퓨저로 구성되어 있다.

2.1. 공기흡입구 및 정체부

캐스케이드 풍동은 불어내기식(open loop)으로서 원심팬(centrifugal fan)을 사용하였고 공기유량은 일련의 조절이 가능한 안내익(adjustable inlet guide vanes)에 의해 조절된다. 원심팬의 전기용량은 22kW이고 사용된 전원은 3상의 AC 440 Volts이다.

원심팬에서 나오는 공기흐름은 정사각형의 출구형태로 배출되고 이후에 원형의 정체부에 유입

되게 된다. 이때 공기흐름이 정체부로 유입되는 과정에서 유동박리나 와류의 발생이 일어나지 않도록 8.5° 각도의 전방 디퓨저가 설치되어 있다. 그리고 원심팬과 전방 디퓨저의 연결은 원심팬에서 발생할 수도 있는 진동이 시험부에 미치지 않도록 캔버스를 사용하고 있다.

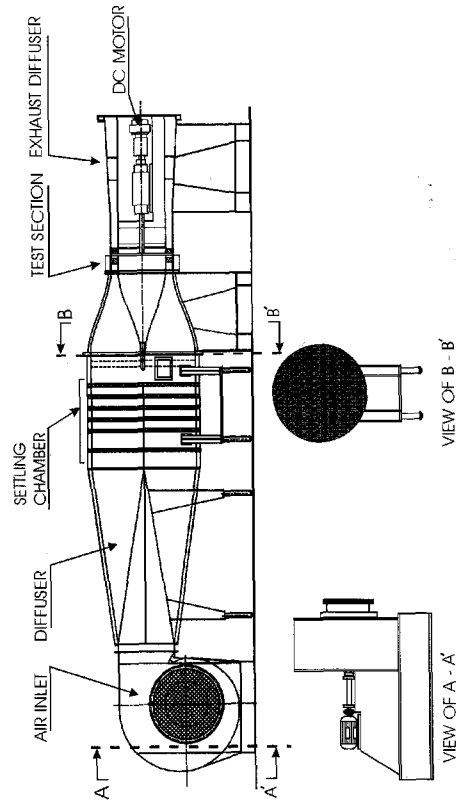


Fig. 1 Annular cascade wind tunnel.

정체부(settling chamber)의 전체 길이는 1500 mm이고 1개의 허니컴과 5개의 스크린을 포함하고 있다. 허니컴의 위치는 정체부 입구에서 약 230 mm 후방에 위치하고 있고, 스크린은 mesh와 재질의 두께를 고려하여 150 mm 간격으로 균일하게 설치되어 있다. 작동유체는 정체부를 지나 수축부(inlet contraction)를 경유하여 시험부를

통과한다. 공기흡입구와 정체부 설계에 대한 설명은 참고문헌에 자세히 수록되어있다.⁽²⁾

수축부 곡면형상은 정체부와 만나는 수축부의 입구와 출구를 기준으로 3차곡선으로 설계되었다. 이러한 수축부 설계는 개조전과 같은 형상으로 제작되었는데 개조전 수축부 하류에서의 유질은 원주방향으로 균일성을 나타내며 방사방향의 예측된 속도분포와 측정된 속도분포는 Fig. 2에서 보여준다. 이때의 난류강도는 0.7%를 나타내었다.⁽²⁾

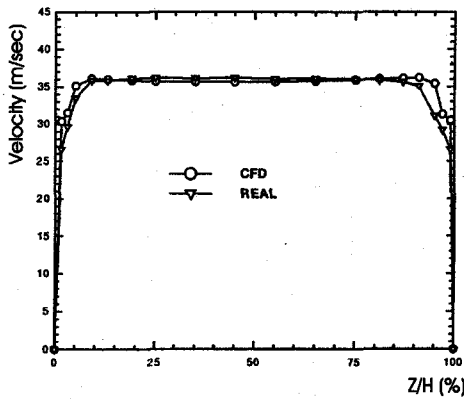


Fig. 2 Spanwise axial velocity profile(2)

2.2. 시험부의 설계

풍동 시험부의 외경은 860 mm이고, 내경은 660 mm이며, 원의 중심을 기준으로 하는 허브와 팁의 반경의 비인 hub/tip 비는 0.76이다. 따라서 시험부는 $\phi 860 \times \phi 660 \times 790$ mm (외부직경 \times 내부직경 \times 시험부 길이)로 결정하였다. 측정부는 전·후에서의 유동장 분석을 위한 측정슬롯이 가공되었으며 이러한 수축부와 시험부의 외통과 내통은 알루미늄으로 새로이 제작하였다. 새로이 제작된 시험부와 회전부 구성은 Fig. 3과 4에 나타나 있고 자세한 내용은 Table 1에 제시되어 있다.

Table 1 Annular cascade wind tunnel specification.

| Parameter | specification |
|-------------------|--|
| Type | Open Loop |
| Test Section | $\phi 860 \times \phi 660 \times 790$ [mm] |
| Contraction Ratio | 7.0 : 1 |
| Working Fluid | Air |
| Volume Flowrate | $470 \text{ m}^3/\text{min}$ |
| Reynolds Number* | 2.15×10^5 |
| Axial Speed | 30 m/s |
| Blower Motor RPM | 1780 rpm |
| Output Power | 22 kW |
| Power Type | AC 440 volts |

* Reynolds Number $Re = \frac{W C_x}{\nu}$

W=동익출구상대속도, Cx=축방향 익현길이
 ν =동점성계수

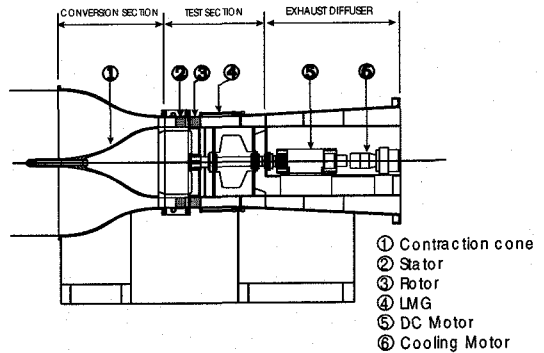


Fig. 3 Schematic of the rotating part

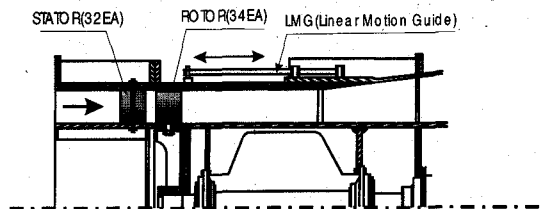


Fig. 4 Schematic of the turbine test section

2.2.1. 블레이드 설계 및 제작

정익(stator)렬은 100 mm 익현(chord)를 갖는 32개의 블레이드로 구성되어 있다. 블레이드는 2차원 형상을 갖는 블레이드(untwisted blade)이다. 정익 블레이드에 대한 자세한 제원은 Table 2에 나타나 있다. 정익 블레이드는 블레이드 내부를 통과하는 긴 볼트를 사용하여 내통과 외통 양쪽에서 너트로 조여 고정되어 있고 재질은 Fiber Reinforced Plastic(FRP)으로 압력에 매우 강한 재질을 사용하였다. 블레이드의 위치가 축 방향으로 이동이 가능하게 되어 있다.

동익(rotor) 블레이드는 NACA 0018을 변형시켜 제작되었는데 반동도(reaction) $R=0.2$ 이며, 유동계수(flow coefficient) $\phi=0.55$, 일계수(work coefficient) $\psi=1.879$ 등의 유체 매개변수를 상사시켜서 제작되었다. 동익렬은 82 mm 익현을 갖는 34개의 블레이드로 구성되어 있으며 동익 블레이드 역시 2차원 형상을 갖는 블레이드(untwisted blade)이다. 동익 블레이드의 팁 간극(tip clearance)은 블레이드 익현 길이의 2% (2 mm)로 정하였고 팁 간극의 제작공차는 블레이드 높이(span)의 $\pm 0.1\%$ (± 0.1 mm)로 제작되었다. 동익 블레이드에 대한 자세한 제원은 Table 3에 나타나 있다.

동익 블레이드는 내통에 볼트로 연결되어 있는데 내통과 블레이드를 연결하는 심은 원심력을 견딜 수 있도록 제작되었다. 동익 블레이드는 가공 및 제작상의 공차를 최소화하기 위하여 기계가공을 통해 정밀한 몰드를 제작한 후 주형용 에폭시를 재료로 하여 진공사출식으로 내부에 기포가 없이 제작하였다. 높이 10 cm의 큰 블레이드를 선택한 이유는 유동장 측정시 탐침으로 인한 유동장 간섭 효과(probe blockage effect)를 감소시키고 측정 위치의 정밀도(space resolution)를 향상시키기 위해서이다.

설계회전수는 914 rpm이며 모터의 가능 최대 회전수는 1500 rpm이다. 이렇게 저속으로 설계된 이유는 안전성이 향상되고 소모전력이 감소되므로 학교내에서 사용하기에 알맞기 때문이다.

Table 2 Parameters for the stator blade

| Parameter | Value |
|-------------------------|-------|
| Blade Chord(mm) | 100 |
| Axial Blade Chord(mm) | 78 |
| Blade Span(mm) | 100 |
| Aspect ratio | 1.0 |
| Hub-to-Tip ratio | 0.76 |
| Inlet Blade Angle(deg) | 0 |
| Outlet Blade Angle(deg) | 66 |
| Stagger Angle(deg) | 38.7 |
| Number of Blades | 32 |

Table 3 Parameters for the rotor blade

| Parameter | Value |
|-----------------------------|-------|
| Flow Coefficient | 0.55 |
| Work Coefficient | 1.88 |
| Reaction | 0.2 |
| Blade Chord(mm) | 82.0 |
| Blade Span(mm) | 98.0 |
| Aspect Ratio | 1.22 |
| Tip Clearance (mm) | 2.0 |
| Inlet Blade Angle(deg) | 26.1 |
| Outlet Blade Angle(deg) | 50.6 |
| Stagger Angle(deg) | 18.4 |
| Number of Blades | 34 |
| Design Rotation Speed (rpm) | 914 |

시험부의 정익과 동익은 기능이 바뀔 때 교체가 가능하게 제작되었는데 특히 정익부분의 내·외통 전체가 착탈이 가능하게 제작되어 있다(Fig. 4). Fig. 5에서는 정익부분이 분리된 것을 확인할 수 있고 Fig. 6에서 보듯이 동익부분은 linear motion guide (LMG)에 의해 외통이 축방향으로 움직이므로 동익 블레이드를 쉽게 교체할 수 있다.

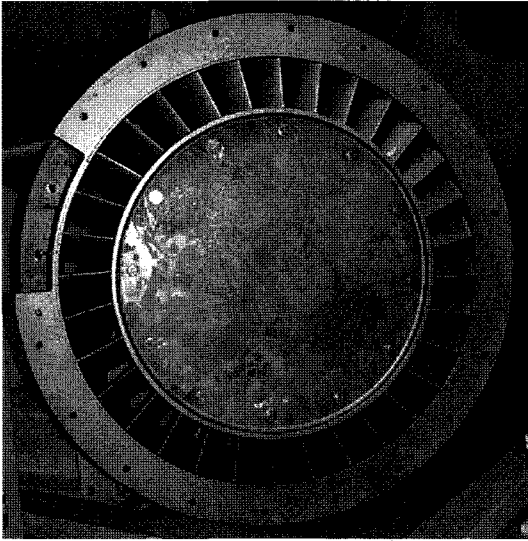


Fig. 5 Stator blades viewed from downstream

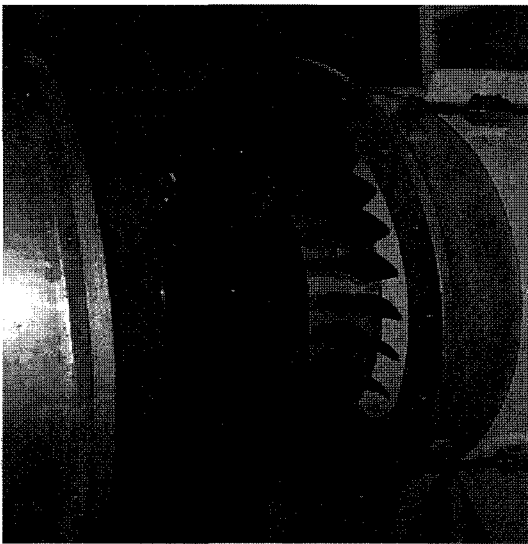


Fig. 6 The turbine rotor blade disk assembly

2.2.2. 측정부 설계 및 제작

측정부는 정익, 동익 상류, 하류와 그 사이에 유동장의 측정을 위한 장비를 삽입하기 위하여 슬롯을 만들었다. 이러한 슬롯을 통해서 5공 probe, 유속측정용 열선 유속계 등 각종 센서를

장착할 수 있다. 이들의 위치는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 상류(far upstream)(1)와 정익 상류(2) (익현 길이의 15%), 정익과 동익사이(3), 동익하류(4) (익현 길이의 20%), 하류(far downstream)(5), 특히 정익의 이동이 가능하게 설계하여 정익, 동익의 사이의 거리변화에 기인한 상호작용에 대한 실험수행이 가능하다. 이에 정익입구에서 일정한 흐름을 갖는지 확인하기 위해 정익의 위치 변화에 따라 측정할 수 있도록 세 개의 슬롯을 가공했고 동익입구의 흐름변화를 측정하기 위한 슬롯을 동익 바로 앞 상류에 가공하였다. 슬롯들의 축방향 길이는 5mm이고 원주방향길이는 200mm (20° 범위) 이므로 축방향과 원주방향의 유동장 분포의 측정이 가능하다.

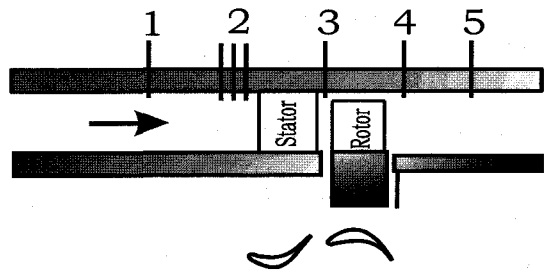


Fig. 7 Upstream and downstream axial locations for aerodynamic instruments

본 실험실에서 보유하고 있는 2차원 자동이송장치(2-D autotraverse)를 축방향과 원주방향으로 이동 가능하게 하는 이송장치는 설계중에 있다. 그리고 이러한 측정슬롯에 측정센서가 장착되지 않을 때의 공기의 누출은 슬롯부분의 형을 떠서 제작한 마개(plug)를 사용하여 방지한다.

2.3. DC Motor/Generator 및 Control Panel

회전부를 구동하고 회전속도를 제어하기 위해 대동정기의 DC모터/발전기를 장착했으며 이는 회상방식으로 되어 있어서 안정적이며 회전수와 공급전류를 확인할 수 있는 조작반(control panel)

을 가지고 있다. DC모터의 소모전력은 15 kW이며 토크는 95.1 N·m를 발생시킬 수 있다. 회전속도는 최대 1500 rpm까지 원하는 속도로 변화시킬 수 있다. 이 회전속도는 SANYO DENKI의 DC tachogenerator로 오차 0.1%로 측정되어 조작반(control panel)에 출력된다.

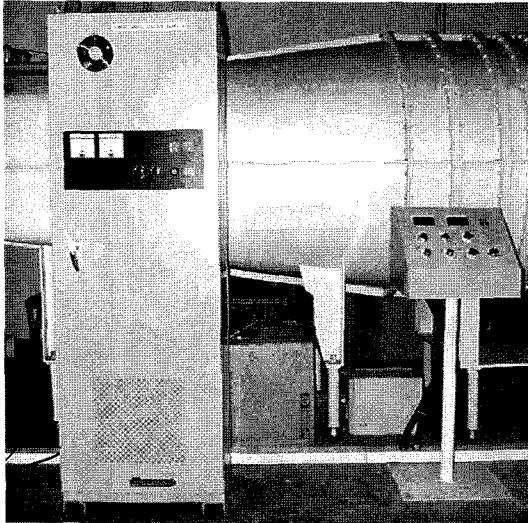


Fig. 8 Test facility control panel

여기서 DC모터/발전기는 회전시험시에는 모터로 작동되고 풍동구동시에는 발전기로 기능을 변환시킬 수 있다. 발전기로 사용될 때 터빈을 통해 전력을 발생시키므로 동력을 재생시키고 break 역할을 해주게 된다. DC모터의 냉각을 위해 0.4kW의 냉각기(blower motor)가 별도로 후방 디퓨저 내통안에 장착되어 있다(Fig. 3).

풍동의 모든 조작은 Fig. 8의 조작반(control panel)을 통해 이루어진다. 조작반(control panel)은 Eurotherm Drives에서 제작한 590 모델을 사

용하는데 교류전압을 직류전압으로 전환시키며 회전부의 회전속도를 조절한다.

3. 결 론

인하대학교 분사추진실험실에서 개발한 터빈시험장치의 주요 특징은 다음과 같다. 첫째, 대형 블레이드를 사용하여 측정시의 오차를 줄일 수 있다. 둘째, 안전문제와 전력 소모문제를 저속 회전설계로 해결하였다. 셋째, 발전기를 통해 송풍기에서 소모되는 동력을 재생시킬 수 있다. 넷째, 시험장비의 시험부는 교체가 가능하므로 다양한 종류의 실험이 가능하다.

후 기

본 연구는 인하대학교 1997~1998년도 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 터빈시험장치를 제작하는데 수고해 주신 서원봉력, 대동정기, ACE의 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Horlock, J.H., "Axial Flow Turbine", Robert E. Krieger Publishing Company, 1973.
- (2) 장영권, "캐스캐이드 형상이 터빈 정익유동에 미치는 영향과 성능향상에 대한 접근방법의 실험적 고찰", 석사학위논문, 인하대학교, 1996.
- (3) 노명수, "터빈정익 통로내에 Splitter Vanes의 적용에 의한 이차흐름 조절에 관한 실험연구", 박사학위논문, 인하대학교, 1996.