

스팀터빈의 공력성능 평가를 위한 공기 상사실험

임병준* · 이은석* · 이익형** · 김영상** · 권기범**

Air Similarity Test for the Evaluation of Aerodynamic Performance of Steam Turbine

Byeung-Jun Lim*, Eun Seok Lee*, Ik-Hyoung Lee**, Young-Sang Kim**,
Gee Bum Kwon**

Key Words : Steam Turbine(스팀 터빈), Air Similarity(공기상사), Performance test(성능실험), Uncertainty Analysis(불확실도 해석)

ABSTRACT

The steam turbine efficiency is an important factor in power plant. Accurate evaluation of steam turbine performance is essential. However, it is not easy to evaluate the steam turbine performance due to its high temperature and high pressure circumstance. Therefore most steam turbine performance tests were conducted by air similarity test. This paper described a test program for air similarity test of steam turbine at Korea Aerospace Research Institute. A test facility has been designed and built to evaluate aerodynamic performance of turbines. The test facility consists of air supply system, single stage test section, power absorption system, instrumentation and auxiliary system. For evaluation of steam turbine performance, the test of single stage axial turbine air similarity performance was conducted and uncertainty analysis was performed.

1. 서론

화력발전용 또는 원자력 발전용 스팀 터빈의 경우, 터빈의 효율이 전체 발전시스템의 효율에 미치는 영향이 크기 때문에 터빈의 성능을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다. 하지만 스팀 터빈은 고온, 고압의 스팀을 작동유체로 사용하기 때문에 성능을 실험적으로 평가하기 어렵다. 따라서 대부분의 경우, 상사법칙을 이용하여 공기를 작동유체를 사용하는 상사시험을 통하여 성능을 평가한다.

최근 국내에서도 터빈 성능시험 평가를 위한 연구들이 진행되어왔으나 대부분 소형 가스터빈의 성능시험을 위한 캐스캐이드 시험설비나 소형 시험설비에서

수행되어왔으나 대형 스팀 터빈 등의 상사시험을 위한 대형 성능시험설비가 부족한 실정이었다⁽¹⁾. 한국항공우주연구원에서는 기존의 대형 공기 공급장치를 활용하여 대형 터빈의 공력성능 평가를 위한 성능시험설비를 설계/제작하여 1단 축류 터빈 로터에 대한 성능 시험을 수행하였다. 이러한 터빈 성능시험설비를 구축함으로써 터빈에 대한 성능시험 평가기술을 확보하여 향후 국내에서 개발되는 터빈의 성능시험평가를 독자적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 상사시험 개요

2.1. 터빈 성능시험

터빈의 성능시험은 기본적으로 특정한 작동상태에서 대상 터빈의 출력과 효율을 구하는 것이며, 터빈

* 한국항공우주연구원

** 두산 중공업

E-mail : bjlim@kari.re.kr

성능시험에서 터빈의 효율은 다음과 같이 구해진다.⁽²⁾

$$\eta_{T-S} = \frac{Q\omega}{\dot{m} C_p T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (1)$$

여기서 Q는 토크, ω 는 각속도, \dot{m} 은 유량, T_{01} 는 터빈 입구 전온도를 나타내며 P_{01} 은 터빈 입구 전압력, P_2 는 터빈 출구 정압력을 나타낸다.

터빈의 성능을 표시하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 먼저 각각 일정한 수정회전속도 ($N / \sqrt{\theta}$)에 대하여 유량변수($\dot{m} \sqrt{\theta/\delta}$)와 터빈 전압력비 및 터빈 비출력과의 관계를 그래프로 나타내는 방법이 있다. 이러한 터빈 성능 표시 방법을 사용할 경우, 터빈 성능시험에서 유량과 회전속도는 터빈 전후의 압력비와 터빈에 작용하는 하중에 의해 설정되며 설정된 작동 조건에서 효율이 결정되게 된다.⁽³⁾

또 하나의 대표적인 터빈 성능표시 방법은 효율과 속도비(U/C_{ad})의 관계를 나타내는 것이다. 여기서 U는 터빈 동익의 회전속도(=대표반경×회전 각속도), C_{ad} 는 터빈 입구 압력에서 출구의 압력까지 가역적으로 팽창했을 때 얻을 수 있는 최대 유체 속도를 의미하고 아래의 식(2)와 같이 정의된다.

$$C_{ad} = \sqrt{2 C_p T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (2)$$

이 속도비는 회전수와 엔탈피 강하량 즉 압력비를 무차원화 시킨 의미를 갖고 있기 때문에 data reduction 및 특성곡선의 전반을 파악할 때 많은 도움이 되며 스팀 터빈 설계에 주로 사용된다.⁽³⁾ 본 시험에서는 효율과 속도비로 표시되는 터빈 성능 표시방법으로 성능시험을 수행하였다.

2.2 터빈 상사시험 설계점 결정

터빈의 상사시험조건은 다음의 다섯 가지 조건을 만족시켜야 정확한 상사를 이룰 수 있다.⁽⁴⁾

1. 기하학적 상사 : 두개의 물체가 크기는 달라도 같은 모양이다.
2. 속도 삼각형이 같다. 여기서 회전속도가 결정된다.

$$\frac{N_R D_R}{\sqrt{\gamma_R R_R T_{01R}}} = \frac{N_S D_S}{\sqrt{\gamma_S R_S T_{01S}}} \quad (3)$$

3. 비열비가 같아야 한다. 통상 비열비가 5%이상 차이가 나는 경우 완전 상사는 없다.

4. 마하수가 같아야 한다.

$$\frac{C_{ad}}{a_R} = \frac{C_{ad}}{a_S} \quad (4)$$

식(4)로부터 비열비를 식(5)와 같이 유도할 수 있다.

$$\bar{\gamma} = \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (5)$$

5. Reynolds 수가 같아야 한다.

$$\left(\frac{ND^2}{\nu} \right)_R = \left(\frac{ND^2}{\nu} \right)_S \quad (6)$$

여기서 하첨자 R은 real, S는 similarity를 나타낸다.

본 연구의 경우, 스팀과 공기의 비열비의 차이가 약 5.5%로 비교적 작으므로 3 조건을 만족한다고 가정하였다. 4 조건은 비열비가 다른 경우, 전체 유동장에 대해 스팀터빈과 동일한 압축성 효과(마하수)를 가지는 것은 이론적으로 불가능하므로 유동장 내의 한 곳, 동익 끝단의 마하수만을 맞추었다. 이때의 압력비는 1.31로서 압축성 효과를 무시할 경우의 압력비 1.29보다 약 1.55% 증가한다. 스팀터빈의 공기상사시험의 경우, 전 유동장에 걸쳐 정확한 상사를 맞추기가 어렵기 때문에 대부분의 경우, 실제 터빈과 같은 압력비를 사용하거나 압축성 효과를 약간 보정해주는 것이 일반적이다. Reynolds 수는 스팀터빈의 경우가 5.7×10^6 이고 공기상사의 경우가 4.6×10^6 으로 그 효과는 상대적으로 작다고 할 수 있다.

본 연구에서는 실제 터빈의 1/3로 축소된 모델 터빈에 대한 성능시험을 수행하였으며 설계/제작된 성능시험설비의 조건에 맞도록 상사시험 설계점을 결정하였다(table 1.). 첫 번째 상사점은 1/3 scale 축소된 형태에서의 압축성 효과를 고려한 공기상사이며 두 번째

Table 1 상사시험 설계점

Parameters	Air similarity 1	Air similarity 2
Scale factor	1/3	1/3
RPM	6350	6131
Inlet temperature (K)	312	312
Inlet pressure (kPa)	172	172
Pressure ratio (total-static)	1.31	1.29
Velocity ratio	0.52	0.52
mass flow rate (kg/sec)	7.3	7.0
Power(kW)	146	131

상사점은 압축성 효과를 무시한 경우로 속도비만을 고려한 것이다. 상사시험은 두 가지의 경우에 대하여 모두 수행하였다.

3. 시험장치 및 시험절차

3.1 터빈 성능시험 설비

터빈 성능시험 설비는 공기 공급장치, 유량계, 유절 조절부, 터빈 시험부, 동력 흡수장치, 배압 조절 밸브로 구성된다(Fig. 1).

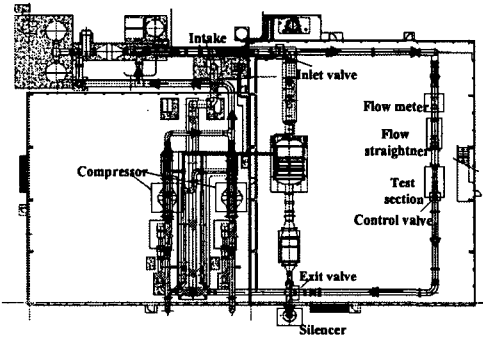


Fig. 1 터빈 시험설비 구성도

공기 공급장치는 항우연 보유 가스터빈 엔진 고공 성능시험 설비의 압축기를 사용하였다. 공기 공급장치는 2대의 압축기로 구성되어 있으며 최대 공급유량은 각각 15.8 kg/sec와 18 kg/sec이며 최대 토출압력은 227.5 kPa이다. 본 시험기에 공급되는 공기의 온도 조절은 35℃를 전후하여 35℃ 이상은 압축기 후방에 위치한 Tube (water) & Shell(air) 방식의 열교환기를

이용하여 온도를 조절한다. 35℃ 이하는 액체공기를 압축된 공기에 혼합하여 온도를 낮추는 방법을 사용하며 이 시스템을 이용하여 안정실내의 온도를 18℃ 까지 조절할 수 있으며 온도설정의 정확도는 +1℃이다.

터빈 시험부는 입구부에 유입 공기의 와류 성분을 제거, 유동의 질을 향상시키기 위하여 직경 900 mm의 stilling chamber와 연결된다. 시험부에서 발생한 진동이 입구 배관으로 전달되지 않도록 bellmouth와 stilling chamber는 inflatable seal로 연결하였다. 시험부를 통과한 공기는 출구 배관으로 빠져나게 되고 시험부의 출구에는 진동의 전달을 방지하기 위하여 주름관(bellows)을 설치하였으며 주름관 후방에 배압과 유량 조절을 위한 공압 컨트롤 밸브를 설치하였다(Fig. 2).

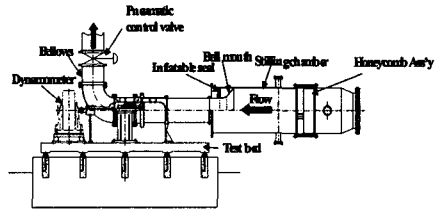


Fig. 2 시험부 구성

터빈 시험부는 정익(stator)으로 유입되는 공기가 갑작스런 유로의 감소로 인한 손실이나 유동박리를 막기 위하여 입구부에 nose cone을 설치하였고 nose cone은 3의 지지대에 의해 지지된다. 정익이 장착되는 ring까지의 전반부 케이싱은 상하로 분리되어 동익 디스크를 교체할 수 있도록 하였다(Fig. 3). Fig. 4에 조립이 완료된 터빈 성능 시험부를 나타내었다.

본 터빈 성능시험에 사용된 동력흡수장치는 Froude Cosine사에서 제작한 와전류형 동력계(eddy-current type dynamometer, AG-250)이다. 동력흡수장치는 터빈 시험부의 회전축과 동축으로 연결되어 토크와 회전

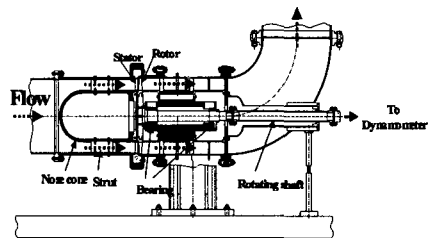


Fig. 3 시험부 단면

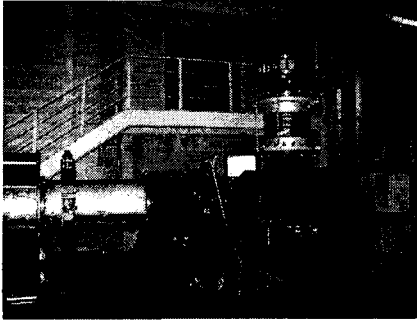


Fig. 4 터빈 성능 시험부

수를 측정하고 제어할 수 있는 장비이다. Eddy-current dynamometer는 absorption type으로 토크에 의해 소산되는 기계적 에너지를 측정하여 엔진과 같은 동력원으로 부터 발생하는 동력이나 토크를 측정하게 된다.

3.2 측정장치 및 자료획득 시스템

터빈의 성능을 측정하기 위한 유량계는 Venturi type 유량계의 일종인 V-cone type 유량계를 사용하였으며 터빈의 회전수와 토크는 동력흡수장치에서 측정된다. 본 성능시험에 사용된 동력흡수장치의 회전수 측정장치는 최대 8,000 rpm까지 측정할 수 있다. 토크는 동력흡수장치에 장착된 로드셀에서 측정되며 시험 전에 400Nm까지 보정을 수행하였다.

터빈의 성능을 측정하기 위하여 시험부의 터빈 단 (turbine stage) 상류와 하류에서 압력과 온도를 측정하여야 한다. 본 연구에서는 터빈 단 상류에 원주방향으로 4곳에 Rake를 설치하여 터빈 입구 유동의 전압력과 전온도를 측정하였으며 하류에서는 원주방향 4곳의 정압력 탭에서 pneumatic average 하여 정압력을 측정하였다. 측정면 위치는 동익의 중간 span 앞전을 기준면으로 동익 코드길이(c)에 대한 비로 나타내었다 (Fig. 5).

온도는 K-type 열전대를 사용하여 측정하였으며 Rake와 정압력 탭은 모두 차압센서(PSI 9016 system)에 연결되어 대기압과의 압력차를 측정하게 된다. 압력 측정시스템은 측정범위가 30psid이고 정확도는 full scale의 $\pm 0.05\%$ 이다.

각 측정 장치로부터 측정된 신호들은 자료획득 시스템 통하여 PC에 기록되게 된다. 열전대로부터 나오는 온도 신호와 유량 신호, 동력흡수장치로부터 나오는 토크와 회전수 신호 그리고 컨트롤 밸브 position 신호는 Agilent 34970A Data logger에서 디지털 신호

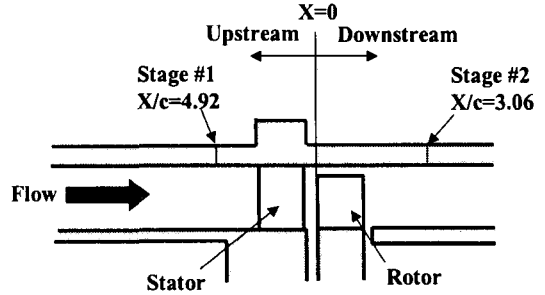


Fig. 5 시험부 측정위치

로 변환되어 GPIB 통신을 통하여 PC에 기록된다. 압력은 PSI 9016 압력 측정 시스템을 통하여 디지털 신호로 변환되고 TCP/IP 통신을 통하여 PC로 전달된다. 터빈 단의 배압을 조절하기 위한 밸브(valve 2)를 제어 신호는 아날로그 출력 보드를 통하여 밸브로 전달된다. 시험 중 안전을 위하여 베어링 부분에 장착된 가속도계 신호는 Dynamic signal analyzer를 통하여 모니터링 하였다. Fig. 6은 자료획득 및 제어 시스템의 구성을 나타낸 것이다.

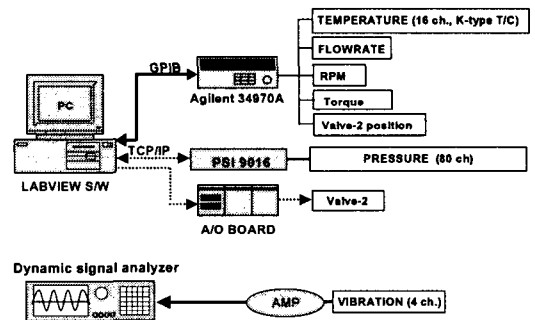


Fig. 6 자료 획득 및 제어 시스템

3.3 시험절차

터빈의 성능시험을 위하여 공기 공급장치에서 압력과 온도를, 동력흡수장치에서는 회전수를 조절한 뒤 배압조절밸브를 조절하여 압력비를 설정하여 원하는 속도비를 선택한다. 그리고 효율 계산에 필요한 변수들을 측정하여 성능시험을 수행한다. Fig. 7은 터빈 성능시험 설비의 개략도를 나타낸 것이다.

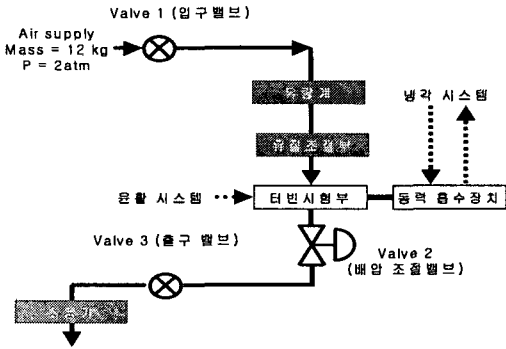


Fig. 7 터빈 성능시험설비 개략도

4. 측정오차 분석

터빈 성능을 정확히 평가하기 위하여 터빈 효율 측정에 대한 오차분석을 수행하였다.

측정 불확도를 포함한 측정결과는 다음 식(7) 같이 나타낼 수 있으며 측정값(r)의 확장 불확도(U_r)는 아래 식(8)과 같이 계통오차(systematic error)에 기인한 불확도 B_r 와 우연오차(random error)에 기인한 불확도 S_r 로 구분할 수 있다.^{(5),(6)}

$$R = r \pm U_r \quad (7)$$

$$U_r = k \sqrt{\left(\frac{B_r}{2}\right)^2 + S_r^2} \quad (8)$$

여기서 k 는 포함인자(coverage factor)로 2~3의 값을 갖는다. 계통오차는 측정센서의 교정이나 설치과정 또는 측정 데이터 처리과정에서 발생하는 오차로 반복 측정과 무관하게 일정한 값을 가지는 오차를 의미하며, 우연오차는 측정값의 불안정성이나 반복시험에 의해 나타나는 오차를 의미하며 보통 모평균의 실험표준오차를 사용한다.

식(9)와 같이 측정값이 여러 가지 측정변수들에 의해 결정되는 경우 계통오차는 아래의 식(10)과 같이 구할 수 있고 감도계수(sensitivity coefficient)는 식(11)과 같이 정의된다.

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (9)$$

$$B_r^2 = \sum_{i=1}^I (\theta_i B_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=i+1}^I \theta_i \theta_k B_{ik} \quad (10)$$

$$\theta_i = \frac{\partial r}{\partial X_i} \quad (11)$$

식(10) 우변의 첫 번째 항목은 각 측정요소의 불확도에 대한 것이고, 두 번째 항목은 측정요소사이의 상관관계에 의한 불확도에 대한 것이다. 터빈 효율은 식(1)과 같이 계산되므로 터빈 효율의 측정에 사용되는 측정변수들은 토크, 회전수, 유량, 입구 전온도, 입구 전압력, 출구 정압력이며 각 변수들은 독립변수이므로 효율의 계통오차는 다음 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_\eta^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial m}\right)^2 U_m^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q}\right)^2 U_Q^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial w}\right)^2 U_w^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{01}}\right)^2 U_{T_n}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{01}}\right)^2 U_{P_{01}}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_2}\right)^2 U_{P_2}^2 \quad (12)$$

각 측정변수들의 불확도가 전체 불확도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Uncertainty Percentage Contribution(UPC)을 식(13)과 같이 정의한다.

$$UPC_i = \frac{(\partial r / \partial X_i)^2 U_{X_i}^2}{U_r^2} \times 100 \quad (13)$$

UPC는 각 측정변수의 불확도가 전체 불확도에서 차지하는 비중을 백분율로 나타낸 것이다.

Table 2는 설계점에서 각 측정 변수들의 계통오차를 나타낸 것이다. 설계점에서 터빈 효율의 상대 계통오차는 0.68%이다. 각 측정변수 중에서 토크의 측정 불확도가 전체 불확도의 39% 이상을 차지하고 입구 전온도의 불확도가 22%를 차지하였다.

Table 2. 설계점에서 각 측정변수들의 B_r 와 UPC

측정 parameter	B_r	UPC_i (%)
토크	1 Nm	39.2
회전수	1 RPM	0.1
유량	0.02 kg/sec	14.2
입구 전온도	1 K	22.0
입구 전압력	0.1 kPa	9.0
출구 정압력	0.1 kPa	15.5

터빈 효율측정에서 우연오차는 크게 측정하는 동안 입구 유동조건이 변하여 발생하는 측정값의 불안정성과 반복시험에 의해 나타나는 오차로 나눌 수 있다.

설계점에서의 정확한 효율측정을 위해서는 측정하는 동안 입구 압력과 입구 온도를 일정하게 유지해 주어야 한다. 입구 온도의 경우 공기 공급장치의 열교환기에 의해서 조절되는데 정확한 조절과 유지가 어렵다. Fig. 8을 보면 시간에 따른 입구 유동조건을 변화시킬 수 있다. 여기서 터빈 효율(η_{td})은 측정된 효율을 설계점의 평균효율로 나누어 무차원화 하였다. 이러한 우연오차는 데이터의 개수가 증가함에 따라 감소하게 되므로 측정 데이터 개수에 따른 효율의 우연오차의 변화를 고려하여 측정 데이터의 개수를 1000개로 정하였고 이때 설계점 효율의 상대 우연오차는 95% 신뢰도에서 0.042%이다(Fig. 9). 우연오차의 경우, 유량의 UPC가 약 68%로 가장 크게 나타났다. 하지만 우연오차의 경우, 계통오차에 비해 상대적으로 크기가 작으므로 전체 합성 불확도에 미치는 영향은 작다.

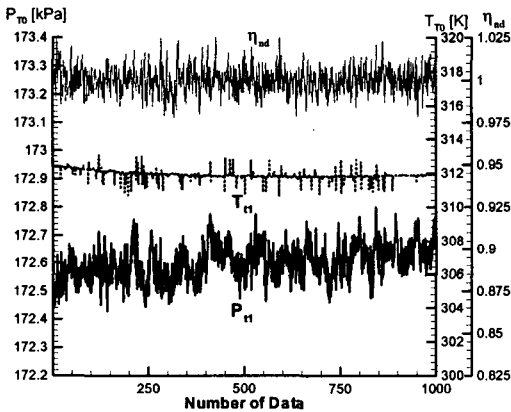


Fig. 8 시간에 따른 입구 압력/온도/효율 변화

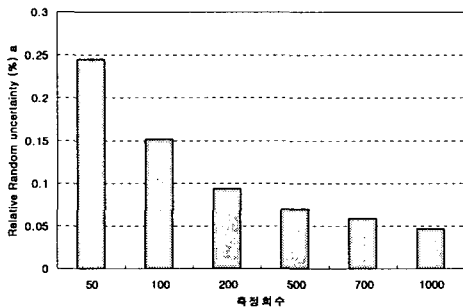


Fig. 9 측정 데이터 갯수에 따른 효율의 상대 우연오차 변화

Table 3. 설계점에서 각 측정변수들의 S_i 와 UPC

측정 parameter	S_i	UPC _i (%)
토크	0.05 Nm	22.5
회전수	0.24 RPM	0.9
유량	0.0027 kg/sec	68.3
입구 전온도	0.02 K	1.7
입구 전압력	0.004 kPa	4.0
출구 정압력	0.1 kPa	2.7

Table. 3에서와 같이 대부분의 오차는 측정 센서의 정확도에 의해 결정되는 계통오차이므로 성능시험의 정확도를 향상시키기 위해서는 측정 센서들의 정확도를 높여야 한다. 특히 전체 오차에 차지하는 비율이 큰 토크와 입구 온도 측정 센서의 정확도를 향상시켜야 할 것으로 판단된다.

Table. 3 설계점 효율의 측정 불확도

parameter	B_{η}	S_{η}	U_{η}
relative	$\pm 0.68\%$	$\pm 0.042\%$	$\pm 0.69\%$

4. 성능시험결과

성능시험은 시험 터빈에 대하여 압축성 효과를 배제한 경우, 즉, 압력비를 스팀 터빈의 경우(압력비 1.29) 과 정확히 일치시킨 경우와 압축성효과를 고려한 경우(압력비 1.31)에 대하여 각각 성능시험을 수행하였다.

Fig. 10은 하중계수와 흐름계수와 의 관계를 나타낸 것으로 하중계수와 흐름계수의 비례관계⁽³⁾가 시험결과를 통해 잘 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 10의 하중계수는 설계점에서의 하중계수로 무차원화한 값이며, 하중계수와 흐름계수의 정의는 식(14)와 식(15)와 같다.

$$\Psi = \frac{Qw}{m U^2} \quad (14)$$

$$\phi = \frac{C_x}{U} \quad (15)$$

여기서 C_x 는 출구의 축방향 속도이고 U 는 blade mean에서의 원주방향 속도이다.

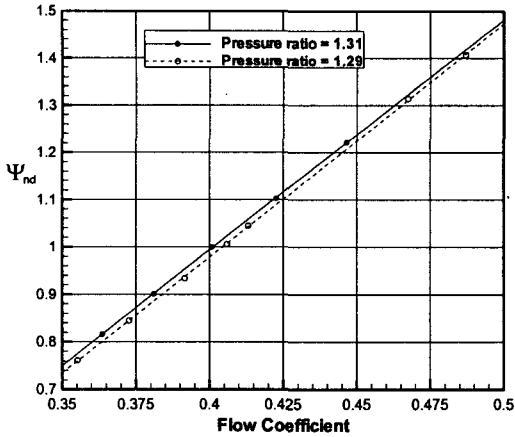


Fig. 11 터빈 성능 곡선 (압력비 1.29 & 1.31)

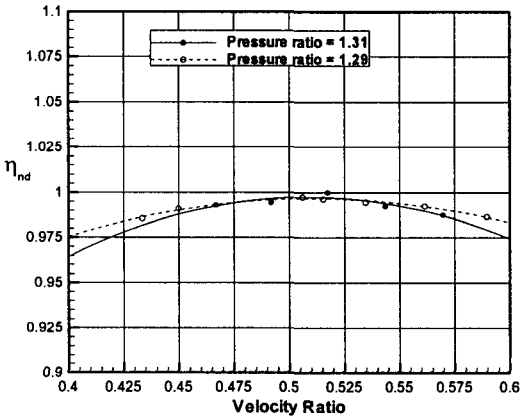


Fig. 11 터빈 성능 곡선 (압력비 1.29 & 1.31)

Fig. 11에 두 경우에 대하여 속도비에 대한 효율의 변화를 비교하였다. 두 경우 모두 설계 속도비(0.52)에서 최대 효율을 보였으며 이것은 스팀 터빈에 대한 적절한 상사시험이 이루어졌음을 의미한다. 효율값은 설계점에서는 두 경우 거의 같은 값을 보였으나 속도비가 낮거나 높은 경우에는 압축성 효과를 고려하지 않은 경우가 약간 높게 측정되었으나 두 경우 성능곡선의 차이는 거의 없다고 할 수 있다.

5. 결론

항우연 소재의 고공엔진 시험동의 공기 공급장치를 이용, 터빈성능시험기를 설계, 제작하여 스팀터빈에 대한 모델터빈의 상사시험을 수행하였다.

상사 시험은 압력비를 스팀 터빈과 동일한 압력비를 사용한 경우와 압축성 효과를 고려한 경우에 대하여 수행하였으며 두 경우 모두 설계 속도비에서 최대 효율이 나타났으며 효율은 유사한 값을 나타내었다.

터빈 성능시험에 사용되는 측정값들에 대한 측정오차 분석을 수행하였으며 효율에 대한 상대 불확도는 설계점에서 $\pm 0.68\%$ 이며 향후 측정센서 교체 등 효율 측정의 정확도를 향상시키기 위한 방안을 모색하여 개선할 예정이다.

후 기

본 연구는 두산 중공업(주)의 지원 및 도움으로 이루어 졌으며, 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 윤용상, 송성진, 김홍원, 조성희, 2001, "회전 환경에서의 축류 터빈 성능평가", 유체기계저널 제4권 제3호, pp. 46~52.
- (2) Song, S. J., 1995, "An Investigation of Tip Clearance Flow Excitation Forces in a Single-stage Unshrouded Turbine", Ph. D. Thesis, MIT. pp. 73~83.
- (3) Horlock, J. H., 1973, Axial Flow Turbine, Robert E. Krieger Publishing Company
- (4) Lakshminarayana, B., 1995, Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery, John Wiley, New York.
- (5) 윤민수, 양수석, 이대성, 2001, "가스터빈엔진의 고공환경성능의 측정불확도 분석", 한국항공우주학회지 제29권 제1호, pp. 128~133.
- (6) H. W. Coleman and W.G. Steele, 1999, Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers, John Wiley & Sons.