입구 Instrumentation의 영향을 최소화하는 터보기계 성능측정방법

강정식*, 안이기**

Turbomachinery Inlet Flow Measurement without the Effect of Instrumentation

Jeong-Seek Kang*, Iee-Ki Ahn**

Abstract

It is absolutely necessary to measure the inlet pressure and temperature of a turbine or a compressor to evaluate the performance of it. And to measure the representative-averaged pressure and temperature of turbine inlet flow, rake is normally used. Rake has several elements for temperature and pressure and several rakes are installed at the inlet to average the radial and circumferential distribution of inlet flow. However the rakes cause unexpected losses and flow distortion at the turbine inlet which make the measured rake data different from true inlet value. So the evaluation of a turbine or a compressor performance becomes not accurate. This study suggest a correlation method which measure the loss by inlet rake and incorporates it in evaluating the performance of turbomachinery.

초 록

터빈 또는 압축기와 같은 터보기계의 성능을 평가하기 위해서는 입구의 유동을 측정해야 한다. 입구의 평균된 유동을 측정하기 위해서는 일반적으로 여러 개의 엘리먼트를 가진 레이크를 여러 개 사용해서 원주방향과 반경방향으로 평균된 유동을 사용한다. 그런데 터빈 입구에서 레이크를 사용하여 터빈 입구의 유동을 측정하면 레이크에서 유동을 측정한 후 레이크 자체가 손실을 일으키므로 터빈 입구에서의 전압력에 차이가 있을 뿐 아니라 교란된 유동이 터빈의 성능에 기대하지 않은 영향을 미치는 문제점이 있다. 그러므로 터빈 입구에 고정적으로 설치한 레이크로 측정한 데이터로는 정확한 터빈의 성능을 평가하는데 오차를 일으킨다. 본 연구에서는 이런 문제점을 해결하기 위하여 터보기계의 시험시 레이크와 레이크 후단에서 프로브를 이용한 상세 유동 측정을 통하여 레이크의 손실을 측정하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 방법을 사용하여 시험을 수행한 결과를 제시하였다.

키워드 : 입구 유동 (inlet flow), 레이크(rake), 터빈(turbine), 압축기(compressor)

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 6일, 2차 : 2009년 9월 17일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

* 항공엔진팀/jskang@kari.re.kr ** 항공엔진팀/ikahn@kari.re.kr

1. 서 론

터빈이나 압축기 등 터보기계의 성능을 평가하기 위해서는 입구의 전압력과 전온도를 측정해야 한다. 식 (1)과 식(2)는 각각 압축기와 터빈의 등엔트로피 효율을 계산하는 식으로서[1] 효율을 계산하기 위해서는 압축기와 터빈의 입구 전압력(p_{o1})과 전온도(T_{o1})의 측정이 필수적으로 요구된다. 압축기와 터빈의 효율(η)을 측정하기 위하여 터빈의 출력과 압축기의 구동동력을 측정하는 방법도 식(1)과 (2)에서와 같이 입구에서의 전압력과 전온도가 필요하다.

$$\eta_{TT,\,Turbine} = \frac{1-(T_{o2}/T_{o1})}{1-(p_{o2}/p_{o1})^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (1)$$

$$\eta_{TT,\,Compressor} = \frac{(p_{o2}/p_{o1})^{(\gamma-1)/\gamma}-1}{(T_{o2}/T_{o1})-1} \quad (2)$$

여기서 p_{o2}는 출구 전압력, T_{o2}는 출구 전온도 그리고 γ는 비열비를 의미한다.

입구에서 평균된 전압력과 전온도를 측정하기 위해서는 일반적으로 여러 개의 엘리먼트(element)를 가진 레이크(rake)를 여러 개 사용한다. 그런데 입구에서 레이크를 사용하여 유동을 측정하면 레이크에서 유동을 측정한 후 레이크 자체가 손실을 일으키므로 레이크를 지나서 터보기계의 입구로 들어가는 유동의 전압력은 레이크에서 측정한 값보다 작아지는 문제점이 발생한다. 또한 레이크들로 인해 유동에 교란이 발생하여 교란된 유동이 압축기나 터빈으로 유입되면서 압축기나 터빈의 성능에 기대하지 않은 영향을 미치는 문제점이 있다. 그러므로 터빈 입구에 고정적으로 설치한 레이크로 측정한 데이터로는 정확한 터빈의 성능을 평가하는데 오차를 일으킨다. 이런 문제점은 비단 압축기나 터빈 뿐만 아니라 팬 등의 터보기계와 가스터빈에서 일반적으로 발생하는 문제이다. 본 연구에서는 이런 문제점을 해결하기 위하여 터보기계 시험시 입구보다 더 상류에서 레이크를 사용하여 유동을 측정하고 입구에서는 프로브를 이용하여 상세 유동 측정을 통하여 레이크의 위치와 터빈 입구(프로브 위치)에서의 손실을 측정하는 방법을 제안하였다. 이 손실은 설계유량 뿐 아니라 최대 유량과 최소 유량을 포함한 영역에서 측정하여 유량에 대한 손실곡선을 확보하면 터보기계의 성능시험 시 작동조건에 따라 레이크의 손실을 평가하여 터보기계의 성능 평가에 반영할 수 있다.

2. 본 론

2.1 성능시험 설비 및 리그

시험 연구는 터빈에서 수행하였다, 터빈의 입구가 압축기의 입구보다 속도가 높으므로 레이크에 의한 효과가 더욱 심하기 때문이다. 터빈 성능시험은 한국항공우주연구원이 보유하고 있는 고온터빈성능시험설비 (High Temperature Turbine Test Facility, HTTTF)에서 수행하였다. 이 설비는 압축기에서 발생한 공기를 전기히터를 사용하여 가열하여 시험용 터빈에 공급하여 연속적으로 터빈시험을 수행할 수 있는 설비이며, 2500마력의 수력동력계를 사용하여 터빈의 회전속도와 동력 등을 제어할 수 있다. 설비의 개념도를 그림 1에 나타내었고 주요한 사양은 표 1에 나타내었으며, 설비에 대한 자세한 소개는 강정식 등[2]에 나타내었다.

시험 대상의 터빈은 pre-swirl vane이 있는 2

표 1. HTTTF의 사양

항 목		단위	사 양
Maximum Speed		rpm	30,000
Maximum Torque		Nm	895
Maximum Power		kW	1,865
Max. Main Flow Rate		kg/s	6.5
Max. Expansion Ratio		-	5.5
TIT	2.1kg/s 미만	℃	700
	2.1kg/s 이상	℃	400

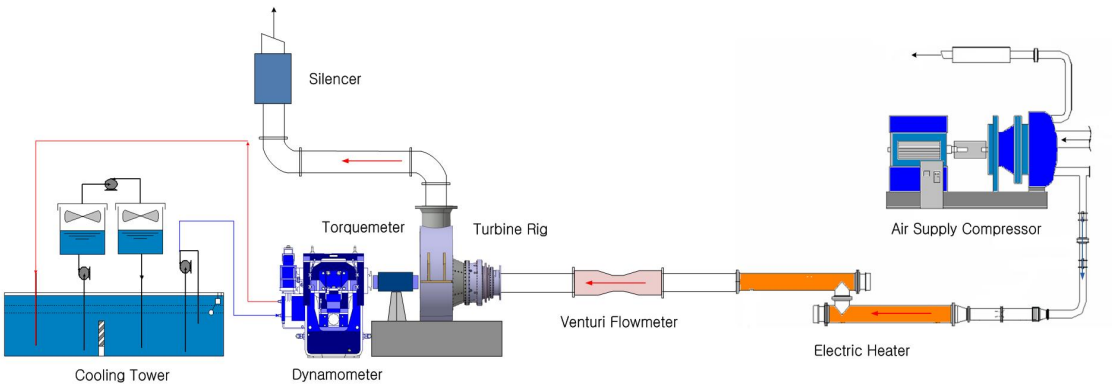

그림 1. Schematic view of HTTTF

단 축류 터빈으로서 그림 2에 개념도를 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 시험대상의 터빈은 트랜지션 덕트(transition duct)와 2단 터빈으로서 성능평가 대상은 트랜지션 턱트의 입구에서부터 2단 로터의 출구까지이다. 그래서 평가해야할 터빈의 입구는 트랜지션 덕트의 입구로서 이 위치에 자동이송장치(traverse)를 설치하였으며 그림 2에 위치를 표기하였다. 트랜지션 덕트의 입구에 레이크를 설치할 경우 레이크에 의한 손실이 발생하고 국부적인 박리 등이 트랜지션 덕트와 터빈에 영향을 미치므로 레이크 대신 3공 프로브를 설치하여 유동을 측정하였다. 3공 프로브는 설치 전에 본 시험조건의 유속과 같은 속도에서 교정을 수행하였다. 교정 범위는 Yaw 각도가 -40°~40°이며, 교정 속도는 36~215 m/s에서 7개의 다른 속도에 대하여 교정을 수행하였다. 데이터 환산(reduction) 방법은 측정 속도와 가장 유사한 속도의 교정 데이터를 사용하여 환산하여 정확도를 높였다. 프로브를 자동으로 이송하는 장치는 프로브를 회전할 수 있고 반경방향으로 이송이 가능하며, 원주방향으로 30도 이송할 수 있어서 pre-swirl 베인 출구에서 여러 개의 vane 출구 유동을 측정할 수 있다. 이 프로브를 사용하여 터빈 입구에서 상세 유동을 측정한 방법과 결과는 강정식 등[3]에서 참고할 수 있다.

터빈의 상류에는 트랜지션 덕트보다 면적이 넓은 곳에 5개의 I형 레이크를 설치하였다. 각각

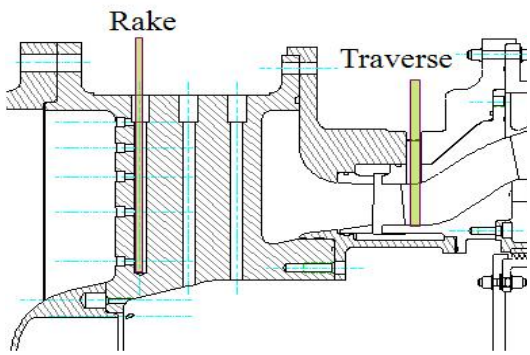

그림 2. Schematic view of turbine test rig

의 레이크는 5개의 엘리먼트를 가지고 있으며 각 엘리먼트들은 반경방향으로 동일한 면적의 중심에 위치하고 있다. 각각의 엘리먼트에서는 전압력과 전온도를 측정할 수 있다. 이 25개의 엘리먼트에서 측정한 전압력을 면적평균하여 상류에서의 전압력을 계산하였다.

2.2 시험 방법 및 결과

트랜지션 덕트의 입구에서는 프로브를 사용하여 원주방향으로 30도 범위를 0.25도 간격으로 자동이송장치를 이송시키며 데이터를 측정하였다. 반경방향으로는 허브에서 팁까지 프로브를 이송시키며 데이터를 측정하였다. 그림 3에는 푸로브를 사용하여 측정한 데이터 중 전압력 분포

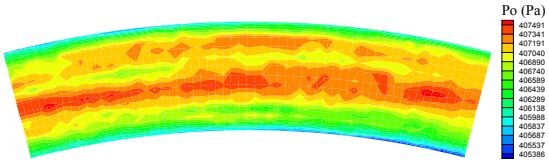

그림 3. 입구 전압력 측정 예 (스월 베인이 없는 경우)

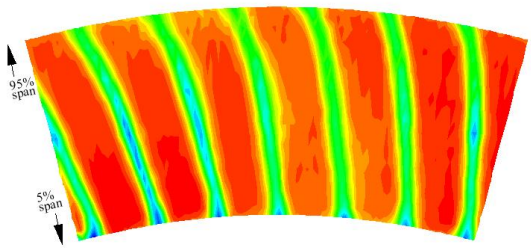

그림 4. 입구 전압력 측정 예 (스월 베인이 있는 경우)

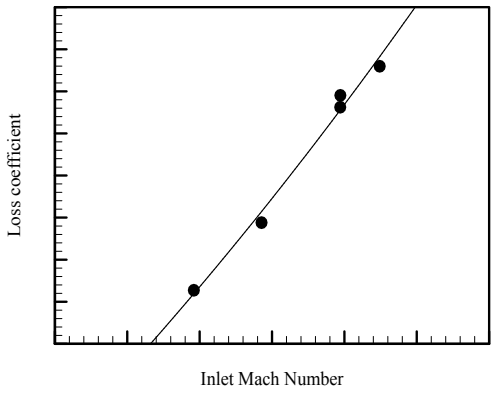

그림 5. 입구 마하수와 입구 손실계수와의 상관관계

를 나타낸 그림이다. 측정한 데이터로부터 전압력과 속도를 계산해서 질량평균을 수행하여 트랜지션 덕트에서의 평균 유동 파라미터를 산출하였다. 그리고 이 시간동안 터빈 상류배관의 레이크에서 데이터를 측정하고 평균하여 평균된 파라미터를 측정하였다. 이로부터 레이크 위치와 프로브 위치에서의 손실관계를 계산할 수 있다. 이 관계를 이용하면 터빈 시험시에 프로브를 빼고 레이크에서 측정한 값만으로도 트랜지션 덕트 입구에서의 전압력을 알 수 있다. 손실식은 다음의 식(3)과 같다.

$$Loss\ coefficient = \frac{Po_{in} - Po_{out}}{Po_{in}} \qquad (3)$$

여기서 Po_{in}은 터빈의 상류에서 Rake로 측정한 전압력 값이다. Po_{out}은 터빈의 입구에서 프로브를 사용하여 측정한 전압력이다. Po_{in}과 Po_{out}은 동시에 측정을 수행한다. 즉, Po_{out}을 프로브로 측정하는 동안 Po_{in}에서 데이터를 계속 측정한다. Po_{in}은 레이크의 특성상 특정한 값을 면적 평균하여 계산하고, Po_{out}은 속도도 측정하므로 질량평균을 수행하여 전압력을 평균한다.

그림 3에 나타낸 데이터의 경우 입구 압력 손실은 0.17% 로 나타났다.

터빈 시험을 설계점에서만 수행할 경우에는 하나의 작동점에서만 위의 시험을 수행하면 되지만, 회전수와 팽창비등을 변화시키며 터빈의 성능지도를 구할 경우에는 터빈 입구조건이 바뀌므로 위의 시험을 모든 작동점에서 수행하거나 대표적인 작동점에서 수행하여 레이크 위치와 프로브 위치에서의 손실관계식을 구하면 향후에는 어떤 위치에서든지 레이크에서 데이터를 측정하면 프로브가 있는 트랜지션 덕트의 입구에서 전압력을 계산할 수 있다. 시험결과를 그림 5에 나타내었다. 시험결과는 터빈의 설계점과 터빈의 성능지도를 구하지 위한 시험 영역 중에서 가장 가장자리에 있는 작동점에서 시험을 수행하여 Curve fitting을 수행하였다. X축은 유량과 관련된 변수로서 분석결과 마하수로 표현하는 것이 가장 적절하였다. 다른 시험조건에서는 손실값은 이 곡선으로부터 구할 수 있다. 이 손실식으로부터 터빈이나 압축기 또는 가스터빈의 성능을 평가할 때 입구에서의 마하수를 측정하면 이로부터 입구 레이크에 의한 손실을 계산할 수 있고 이로부터 압축기, 터빈 또는 가스터빈 입구에서의 전압력을 계산할 수 있게 되어서 평가 대상의 터보기계에 대한 정확한 성능 분석을 수행할 수가 있다.

3. 결 론

터빈 또는 압축기 등의 터보기계의 공력성능 시험에서 입구에서의 유동 파라미터를 측정하기 위하여 전통적으로 레이크를 쓰는 방법이 성능에 미치는 영향에 대한 문제점을 제기하였으며, 문제점을 해결하기 위한 방법으로 상류 레이크와 입구 상세유동 측정을 통한 손실 양을 평가해서 이를 성능평가에 반영하는 방법을 제시하였다. 입구에서의 손실은 입구 마하수에 대한 관계식으로 표현될 수 있으며 이를 통해 다양한 시험조건에서의 손실 차이를 모두 고려할 수 있었다. 두 가지의 터빈 성능시험에서 이 방법을 사용한 결과를 제시하였으며, 시험결과 이 방법을 사용하면 터빈의 성능을 정밀하게 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 이 방법을 사용하면 터빈 또는 압축기의 입구에서 레이크 등의 Instrumentation을 설치하지 않으므로 입구에서 불필요한 교란을 일으키지 않고 입구 유동을 측정할 수 있다는 점에서 더욱 정밀한 터보기계 또는 엔진의 성능평가가 가능한 장점이 있다.

참 고 문 헌

1. Japikse, D. and Baines, N. C., Introduction to Turbomachinery, Oxford, Oxford University Press, 1994, pp. 2-17.
2. 강정식, 양재준, 차봉준, 안이기, “2500마력급 고온 터빈성능시험설비의 개발,” 제16회 지상무기 학술대회, 2008, pp. 181.
3. 강정식, 양재준, 차봉준, 안이기, 이대성, “2단 축류 터빈의 공력성능시험-입구유동 측정,” 2008 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2008, pp. 235-236.