

축류형터빈 전효율에 파급된 불확도에 관한 실험적연구

조수용* · 김은종**

An Experimental Study on the Propagated Uncertainties on the Total-to-total Efficiency of an Axial Turbine

Soo-Yong Cho · Eun-Jong Kim

ABSTRACT

The uncertainties generated by measurement parameters are propagated to the uncertainty of total-to-total efficiency on an experiment. The effect of uncertainties' propagation are analyzed through a turbine performance test. A tested 3-D axial type turbine has a 0.373 degree of reaction at the mean radius and the performance test is conducted at the low pressure and cold temperature status. The uncertainty of turbine inlet and exit total pressure shows the strong propagation effect to the uncertainty of total-to-total efficiency. This means that a high precision pressure measuring system is required to reduce the uncertainty propagated by the pressure. In the uncertainty portion of each measurement parameters to the uncertainty of total-to-total efficiency, the uncertainty by torque is the highest and the uncertainty by RPM is the lowest. In case of the total pressure, the effect of the uncertainty by torque is increased with the increasing RPM. The uncertainty of total pressure at the turbine exit shows more influence to the results than that at the turbine

초 록

실험에서 측정변수에 발생하는 불확도가 터빈 전효율의 불확도에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석하였다. 단단 축류형 3차원 터빈이 실험에 사용되었으며 평균반경에서 반응도가 0.373이며 상온 저압 상태에서 실험이 수행되었다. 입구/출구전압력에 의하여 발생하는 불확도는 터빈 전효율의 불확도로 전파되는 영향이 상당히 크게 나타나므로 상온저압시험에서는 높은 정밀도를 갖는 압력계가 필요하게 된다. 측정변수의 불확도가 전효율의 불확도에 차지하는 영향은 토크에 의하여 발생하는 불확도가 가장 크게 나타났으며 회전수에 의한 불확도가 가장 적었다. 토크의 불확도 영향은 회전수의 증가에 따라 증가하는 경향이 있다. 전압력의 경우는 출구측에서의 불확도가 입구측에 비하여 영향력이 크게 나타났다.

1. 서 론

* 경상대학교 항공기부품기술연구센터 (ReCAPT)

** 경상대학교 항공공학과 대학원

수행되어진 실험의 결과가 유용하게 적용되어 지기 위하여서는 얻어진 결과에 실험의 수행에 따른 불확도가 평가되어야 한다. 또한 새로운 실험에서는 불확도의 요구조건을 만족할 수 있도록 계획되어야 한다. Moffat[1]는 DRE(data reduction equation)에 따라 결과의 정확성이 달라짐을 보여주었다. Kline[2]는 실험에 있어서 불확도의 중요성과 실험결과에서 불확도의 분석방법에 대하여 보여주었다. Coleman and Steels[3]은 실험에서 발생하는 오차가 결과에 전파되어지는 영향에 대하여 분석하였다. Steels and Coleman [4]은 측정장비의 조절에 따라 불확도를 줄일 수 있음을 보여주었다.

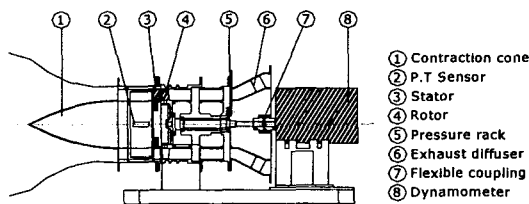


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

2 실험장치 및 방법

터빈의 성능실험을 위하여 사용된 시험장치의 개략도는 Fig. 1에서 보여주고 있다. 터빈의 효율을 평가하기 위하여 필요한 물성치의 측정은 입구측인 ②번의 위치에서 입구전압력과 전온도를 측정하였다. 또한 질유량을 측정하기 위하여 ②번의 위치에서 유속을 측정하였다.

실험에 사용된 터빈은 저압저속터빈[5]이며 평균반경에서 반동도가 0.373인 축류형 3차원 터빈으로써 터빈의 단수는 1단이며 출구에서의 에너지 손실을 최소화하기 위하여 선회속도가 없도록 설계되었다. 본 연구에서의 전효율은 아래와 같이 정의하였다.

$$\eta_{t-t} = \frac{T_q \Omega}{J \dot{m} C_p T_0 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (1)$$

식(1)에서의 T_q 는 출력토크를 의미하며 J 는 변환계수를 나타낸다. 실험으로부터 전효율을 구하기 위하여 필요한 변수는 T_q (토크), Ω (회전수), \dot{m} (질유량), T_0 (입구전온도), P_0 (입구전압력), P_2 (출구전압력)으로써 6개의 측정치가 필요하며 이 측정치가 불확도 해석의 변수가 된다. 실험은 상온영역에서 수행되어 온도의 변화율이 적은 관계로 γ , C_p , J 의 불확도는 무시한다. 각각의 변수에서 발생된 불확도는 DRE를 통하여 전파되어지며 최종결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 실험의 계획단계나 마무리에 있어서 이들의 영향을 미리 예측하여 제어할 뿐만 아니라 최종 결과에 미친 효과를 분석하는 것은 아주 중요한 과정이다.

3. 결과 및 분석

터빈의 효율을 분석을 하기 위하여 실험에서 얻어지는 물성치에는 불확도가 포함되어 있으며 이 불확도에는 실험과정에서 발생하는 각각의 오차들이 결합되어 측정치의 불확도를 증가시킨다.

$$U_j = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^M e_i^2} \quad (P\%) \quad (2)$$

측정결과에서 발생하는 오차는 바이어스오차와 정밀오차로 나타낼 수 있으며 이러한 오차가 발생되어지는 과정은 장비의 보정에서 발생되는 오차와 데이터의 획득 및 정리과정에 발생되어지는 오차들이 있다. 오차의 다양성에 의하여 참값은 통계적인 분석에 의하여 확률적인 추론으로 나타내며 일반적으로 95%의 확률수준이 적용된다.

Fig. 2는 전효율의 변화를 불확도의 범위와 함께 보여주고 있으며 Fig. 2에서의 각 선도에

대한 수치는 터빈입력값을 의미한다. 효율은 터빈의 입력값이 3.2인 경우에 회전수가 저하함에 따라 최고 효율점이 얻어짐을 알 수 있으며 입력값이 1.0인 경우에는 회전수가 증가하면서 효율이 증대하고 있음을 알 수 있다. 이러한 것은 실험에 사용된 터빈의 설계점이 1,800 RPM이기 때문이다. 불확도의 범위도 설계점영역에서 가장 적은값을 나타내며 탈설계 영역으로 이동하면서 불확도의 범위도 증대하고 있다. 이것은 탈설계영역에서 효율이 낮기 때문이다.

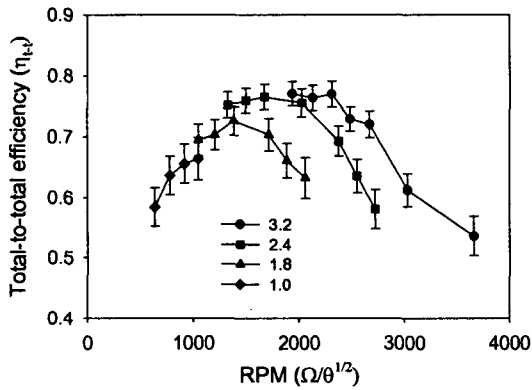


Fig. 2 Total-to-total efficiency with various input power and uncertainty bands

기본적인 오차에 의하여 발생되어진 변수들의 불확도는 DRE에서 전파되어지며 오차의 전파처럼 RSS에 의하여 전파되어진다.[6] 따라서 전효율의 불확도는 아래와 같이 표현되어진다.

$$\frac{U_{\eta_{t-t}}}{\eta_{t-t}} = \pm \left[\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_i}{\eta_{t-t}} \frac{\partial \eta_{t-t}}{\partial x_i} \right)^2 \left(\frac{U_{x_i}}{x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Fig. 3에서 전효율에 대한 불확도를 보여주고 있으며 터빈의 입력을 낮추게 되면 효율의 불확도가 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 이유는 낮은 입력에서 측정된 터빈의 전효율이 낮은 영역에 해당되므로 효율의 절대불확도 치수는 큰 차이가 없으나 효율에 대한 %로 나타내면 낮은 효율에서 증가하기 때문이다. 따라서

설계점의 영역에서 가장 낮은 불확도를 보여주고 있다.

각각의 측정변수들에서 발생된 불확도가 DRE를 통하여 어떻게 전파되어지는 가에 대한 측도가 UMF(uncertainty magnification factor)이다.

$$UMF = \frac{x_i}{\eta_{t-t}} \frac{\partial \eta_{t-t}}{\partial x_i} \quad (4)$$

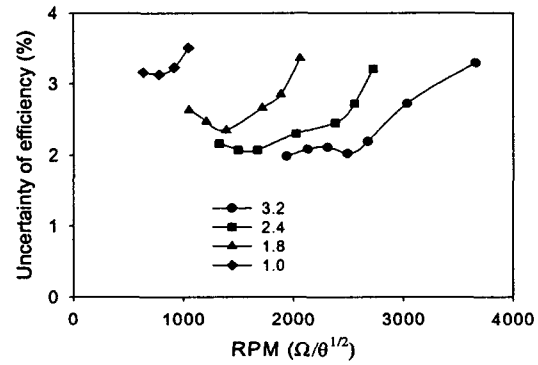


Fig. 3 Uncertainty of total-to-total efficiency with different input power

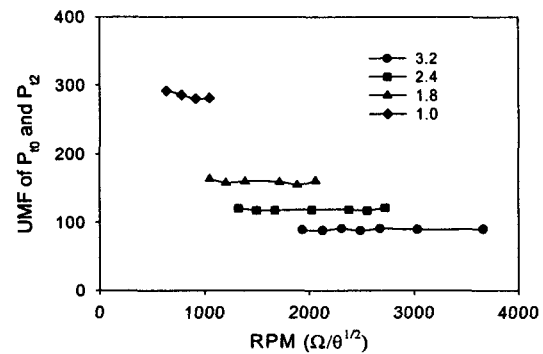


Fig. 4 Uncertainty magnification factor of inlet and exit total pressure

Fig. 4에서 P_{01} 과 P_{02} 의 UMF의 값을 보여주고 있다. 전효율과 관련된 그 외의 변수인 T_{t1} , T_{t2} , Q , \dot{m} 의 UMF는 1이다. 전압력의 UMF가 큰 값을 나타내는 이유는 실험에서 팽창비가 낮기

때문이다. 따라서 압력계의 불확도를 낮출 수 있는 정밀압력계가 사용되어야함을 알 수 있다.

USP (uncertainty sensitivity percent)는 전효율불확도에 영향을 미치는 각각의 측정변수들에서 야기된 불확도가 전효율불확도에 차지하는 측정변수불확도의 영향을 평가하기 위한 것으로 아래와 같이 정의된다.

$$USP = \frac{\left(\frac{\partial \eta_{t-t}}{\partial x_i} U_{x_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial \eta_{t-t}}{\partial x_i} U_{x_i} \right)^2} 100 \quad (5)$$

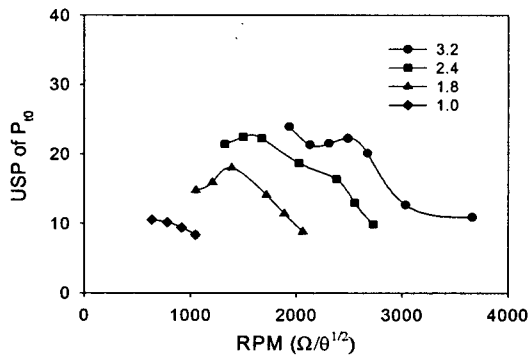


Fig. 5 Uncertainty sensitivity percent of P₁₀

4. 결 론

축류형 3차원 단단터빈에서 터빈의 전효율불확도에 대하여 측정변수의 불확도가 미치는 영향을 파악하는 실험을 수행하였다. 전효율불확도에 측정변수들에서 발생되어진 불확도가 DRE를 통하여 전파되어지는 영향을 나타내는 UMF는 입구와 출구전압력의 영향이 상당히 크게 나타났다. 따라서 압력측정 계기의 불확도를 줄여야 전효율에서의 불확도를 줄이게 된다.

측정변수들의 불확도가 전효율불확도에 미치는 영향을 나타내는 USP는 회전수에 의한 USP가 가장 적게 나타났으며 터빈입력의 증가와 회전수의 증대에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 측정변수중에서 토오크의 USP가 가장 큰 영향

을 보여주었으며 토오크의 불확도는 회전수의 증가에 따라 증대하는 경향을 보여주었다. 특히 낮은터빈입력에서 회전수의 증가에 따라 급격한 증가를 보여주었다. 터빈입구전온도, 질유량, 터빈입구전압력의 USP는 회전수의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주었으며 터빈입력을 낮출수록 감소하는 경향을 보여주었다

후 기

본 연구는 과학재단지정 항공기부품기술연구센터와 BK21의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Moffat, R. J., "Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment," J. of Fluids Engineering, Vol. 107, 1985, pp.173~178.
2. Kline, S. J., "The Purposes of Uncertainty Analysis," J. of Fluids Engineering, Vol. 107, 1985, pp.153~160.
3. Coleman, H. W. and Steels, W. G., "Some Considerations in the Propagation of Bias and Precision Errors into an Experimental Results," FED-Vol. 58, 1987, pp.57~62.
4. Steels, W. G. and Coleman, W. G., "Use of Uncertainty Analysis in the Planning and Design of an Experiment," FED-Vol. 58, 1987, pp.63~67.
5. 김동식, 조수용, "정·동익 축방향 간격에 따른 단단 축류터빈의 성능시험에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제30권제4호, 2002, pp.99~105.
6. Kiline, S. J. and McClintock, F. A. "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," Mech. Eng., Jan., 1953, pp.3~8.
7. Hudson, S. T and Coleman, H. W "A Preliminary Assesment of Methods for Determining Turbine Efficiency," AIAA 96-0101, Reno, 1996.