

단단 3차원 축류형 터빈 성능시험에 관한연구

김동식 · 조수용*

A Study of One-Stage 3-Dimensional Axial Turbine Performance Test

Dong-Sik Kim · Soo-Yong Cho*

ABSTRACT

An axial-type turbine design technology is developed. In order to design one-stage turbine, preliminary design method is applied, and then design parameters are chosen after analyzing the gas properties within the turbine passage using the streamline curvature method. Stator blade is designed using C4 profile, and rotor blade is designed using shape parameters. The output power is measured with various RPM and input power. The experimental result shows that the output power is proportionally decreased with the negative incidence angle.

초 록

본 연구에서 터빈 설계기술이 개발되었다. 설계를 위하여 우선적으로 기본형상에 대한 설계가 이루어졌으며 유선곡률법에 의하여 터빈 내부유로에서의 공기 물성치를 계산하였다. 계산된 여러 유로에서의 유동각들을 고려하여 익형의 형상을 설계하기 위한 설계변수들이 설정되었다. 설정된 형상변수로부터 정익은 C4 형상을 사용하여 설계되었으며 동익은 설계변수에 의하여 설계되었다. 여러 입력력과 RPM에 따라서 출력이 얻어졌으며 실험의 결과는 입사각이 줄어드는 것에 비례하여 출력이 감소하는 현상은 보여주었다.

1. 서 론

터빈익형을 형상화하기 위하여 2차원 형상을 설계하고 반경방향으로 다르게 분포되어진 속도나 압력, 온도 등의 특성과 가스의 유입각과 출구각에 맞도록 3차원의 형상을 설계하였다. 2차원의 형상은 여러 케이스케이드에 대한 실험의 결과를 참고하거나 때에 따라 다른 형상으로 설계할 경우에는 케이스케이드 실험을 통하여 형상 변수들을 설정하여 왔었다. 따라서 익형의 형상

효율에 관한 연구는 단순히 2차원적인 익형의 형상에서 시도하여 왔었다. 실제의 경우와 케이스케이드 실험에 의한 결과와는 유동조건이 상당히 다르므로 실제적용에도 상당한 차이가 발생된다.

본 연구에서는 형상변수의 선정에 따른 익형을 설계⁽¹⁾ 및 제작하였으며 시스템의 성능향상에 큰 영향을 미치는 익형의 설계변수에 대한 연구가 가능한 터빈시험장치를 개발하였으며 입사각의 변경에 따른 출력의 변화를 시험하였다.

* 경상대학교 항공기부품기술연구센터(GSNU, ReCAPT)

2. 터빈설계 및 시험장치

2.1 기본형상설계

터빈의 형식은 저압 저속 터빈이므로 가능한 충동형의 터빈이 좋지만 평균반경에서의 충동터빈은 허브에서 반동도가 영 이하가 되기 때문에 이를 피할 수 있도록 0.373의 반동도를 주어 전 영역에서 양이 되도록 하였다. 터빈의 출력은 1.4kW로 선정하여 충동형에 가까운 축류형 3차원 터빈을 개발하였다. 터빈의 공력학적 설계값들은 Table 1에 요약되어져 있다.

Table 1 Aerodynamic properties of test turbine

CONTENTS	SPECIFICATIONS
Stages	1
Rotating Speed (RPM)	1,800
Mass Flow	1.88kg/sec(4.1lb/sec)
Power	1.4 kW (1.88hp)
Turbine Inlet Temp.	293.1 K (527.6 R)
Inlet Total Pressure	104.87 kPa (15.21psi)
Expansion Ratio(P_{01}/P_{02})	1.012
Exit Temperature	290.7 K (523.4R)
Efficiency (η_{t1})	72.6 %

터빈의 단수는 1단으로 하였으며 출구에서의 에너지 손실을 최소화하기 위하여 출구에서의 선회속도가 없도록 하였다. 평균반경해석에 의하여 정·동익 입출구에서의 가스의 열역학적, 유체역학적 물성치를 평균 반경에서 구하였으며 허브와 팁에서의 물성치는 자유와류법에 의하여 구하였다. Table 2는 터빈의 기본형상을 나타내고 있다.

Table 2 Specification on the design point

Stator Exit Flow Angle (α_1)	37.3°
Flow Coefficient ($\phi = C_u/U$)	1.68
$R = (h_1 - h_2)/(h_{10} - h_{22})$	0.373
$\psi = 2 \Delta h/U^2$	2.55
Mean Diameter (D_m)	257.56 mm
Tip Diameter at Exit (D_{t2})	300.0 mm
Hub Diameter at Exit (D_{h2})	206.5 mm

익형의 설계를 위한 익현비(solidity:s/c)는 중요한 설계변수로서 최적의 익현비는 이론적으로 계산된 값과 실험에 의하여 구하여진 값과 경향이 일치되지 않는다. 본 연구에서는 Cohen⁽²⁾등

에 의하여 제시된 최적의 익현비와 Stewart and Glassman⁽³⁾에 의하여 제시된 값의 비교에 의하여 선정하였으며 정익과 동익의 익현비를 각각 0.8과 0.7로 선정하였다.

2.2 익형설계

익형을 형상화하기 위하여 유선곡률법으로 계산되어진 각 유선에서의 결과를 사용하고 형상 설계기법을 이용하여 형상화한다. 하지만 익형을 형상화하는 데는 여러 가지의 설계방법들이 존재한다. 본 연구에서는 설계변수를 사용한 설계기법을 채택하여 익형을 설계하였다.

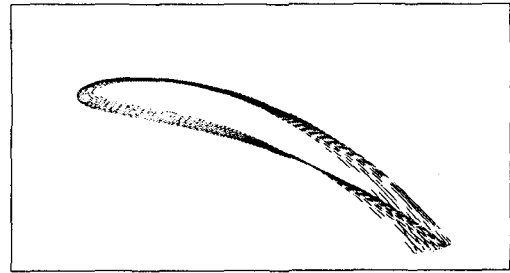


Fig. 1 Stator profile developed with C4 profile along the radial direction

정익은 회전하지 않으므로 입사각의 부분은 특별히 고려하지 않아도 되지만 출구에서의 엇갈림각은 존재하므로 이를 고려하여야 한다. 출구각을 얻을 수 있는 식은 Carter가 제안한⁽²⁾ 엇갈림각 식과 Wilson and Korakianitis에 의하여 제안한⁽²⁾ 식이 있다. Wilson and Korakianitis에 의하여 제안한 식은 익형의 형상이 설계되어야만 사용할 수 있는 익형의 곡률 반경이나 목의 크기가 필요하므로 설계 시에는 Carter가 제안한 엇갈림각의 예상식을 적용하였다.

동익의 설계를 위하여 우선적으로 고려되어야 할 것은 정익과 마찬가지로 유동의 입출구각이다. 동익의 경우는 회전하는 관계로 가스의 유동각과는 달리 유도 입사각(induced incidence)이 존재하게 된다. 본 연구에서는 엇갈림각과의 고려를 통하여 계산되어진 유도입사각에서 충동터빈이 되는 허브측에서 입사각이 7도가 되도록 1.96도를 추가하여 익형의 입구각을 선정하였다.

동익의 설계를 위한 형상변수들의 값들에서 시위 길이는 팁으로 가면서 줄어들게하여 원심력에 의한 보상을 하였다. 허브에서 동익의 두께가 팁에 비하여 크지게 되도록 입구 사이각이

나 unguided 회전각 등을 크도록 설정되었다.

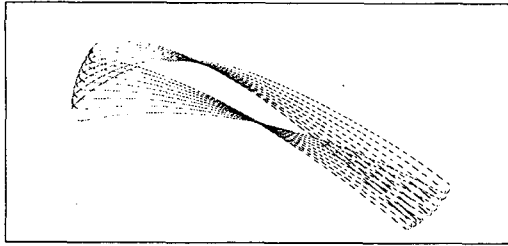


Fig. 2 Rotor profile along the radial direction

Fig. 2는 반경방향으로 설계되어진 시험용 로터의 형상이다. 익형 내부 영역은 가능한 목부분까지 균일한 감소를 가지도록 하였다. 그러나 충동터빈의 익형인 경우는 목부분이 익형의 중간에 존재하게 된다. 하지만 익형의 내부통로가 균일하게 변화되도록 설계하고 반동터빈에 접근할수록 이러한 현상은 배제할 수 있다.

2.3 시험장치

3차원 익형의 성능시험은 저속에서 행해지며 풍량의 조절에 따라 여러 회전속도에서의 측정이 가능하다. 동익은 여러 다른 형상에 대하여 시험이 가능하도록 디스크에서 분리할 수 있도록 제작되었다. 또한 동익의 입사각 각도를 변화하기 위하여서는 여러개의 디스크를 제작하였다.

Fig. 3의 시험장치 앞부분에 있는 원추형상은 환상형의 균일한 유동을 형성하기 위하여 제작하였으며 이 부분은 풍동의 축소부에 들어간다. 설치된 익형의 효율을 평가하기 위하여 다이내모미터와 연결하여 일정회전수로 제어하여 출력을 측정할 수 있도록 하였다. 다이내모미터는 직류전류를 조정하여 전기적인 제동을 발생시켜 토오크, 회전속도의 조절이 가능하도록 하였다. 조절속도는 5000RPM 까지 가능하며 3600RPM에서 7.5HP마력의 출력을 얻게된다. 최대토오크는 250kgf·cm 이다. 토오크 검출기의 로드셀은 $\pm 0.5\%$ 이하의 정도를 갖고 있다.

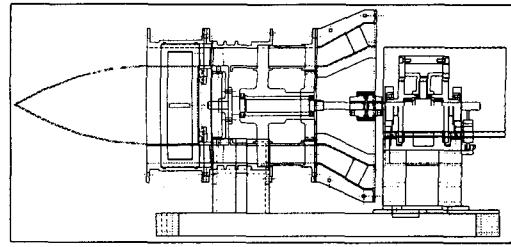


Fig. 3 Test rigs for axial turbine blade

2.4 시험결과

Fig. 4에서의 여러 선도에 따른 값은 입력력으로 단위는 kW를 나타낸다. 입력이 2.98kW의 경우에는 축방향 속도가 40m/sec를 나타내었으며 입력이 2.37kW인 경우에는 36.5m/sec를 나타내므로 이 범위가 설계점에 가까운 영역이 된다. 따라서 두 곡선(역삼각형의 심볼을 가짐)의 변화를 보면 설계점과 같은 1800RPM 영역에서 최고의 효율이 얻어짐을 알 수 있다. 그러므로 앞서 언급되어진 터빈의 설계 기법은 상당히 정확한 것을 알 수 있다. 입력의 증가에 따라 축방향 속도도 증대하여지는데 입력이 8.07kW가 되는 경우에는 55.5m/sec가 되어진다. 따라서 설계되어진 블레이드에서 최고 효율을 얻기 위하여서는 회전속도의 증가가 필요하게 된다. Fig. 8의 결과를 보면 입력의 증대와 함께 최고 효율점의 위치는 회전속도가 크지게 됨을 알 수 있다. 다이내모미터에서 측정하는 출력은 설계된 속도삼각형을 만족하게 되면 입력과 비례하여 출력을 얻게됨을 알 수 있다. 그리고 입력과 출력의 비는 최고 효율의 회전수에서는 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 것 처럼 출구에서의 유용에너지를 고려하지 않았으므로 출구에서의 유용에너지는 다르다. 하지만 같은 속도 삼각형으로 작동되어지고 있으므로 회전수가 높은 상태가 출력이 크고 입력에 따라 측정하는 상태도 동일하므로 입력과 출력과의 비는 동일하다.

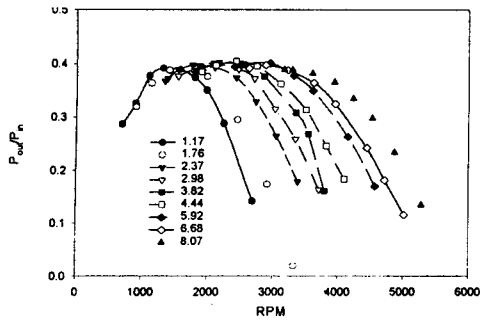


Fig. 4 Output power with various RPM (designed incidence angle)

Fig. 5는 설계점으로 설정된 상태보다 블레이드를 7.5도 회전시켜 디스크에 블레이드를 장착한 경우이다. 따라서 블레이드의 입사각이 영에 가까워지게 된다. 따라서 입사각이 없이 유동이 형성되어지는데 유동의 측면에서는 복잡하지는 않지만 압력면과 흡입면 주위를 흐르는 유동의 속도차가 적어져 블레이드의 부하가 적어지는 문제점이 발생한다. 따라서 비슷한 입력에 비하여 다이내모미터를 통하여 얻게되는 출력은 블레이드의 부하와 직접적인 관계가 있으므로 저하하게된다. 앞서의 설계된 입사각에 비하여 출력값은 5% 정도의 저하가 발생되어짐을 알 수 있다.

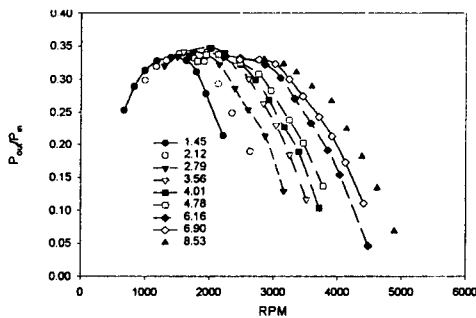


Fig. 5 Output power with various RPM ($\alpha = -7.5$)

3. 결론

기존의 실험에서는 케스케이드의 상태에서 실험을 수행하였으나 본 연구에서는 3차원 회전장치를 부착한 실험장치를 개발하였다. 본 장치에서는 출력 및 회전수의 제어가 가능하도록 제작되었으므로 케스케이드의 실험에서 얻었던 결과보다는 정확도가 향상된 결과를 얻게 되었다.

본 연구에서는 입사각이 음의 값으로 가면서

입력대비 출력이 입사각의 감소에 비례하여 줄어들었다.

참고 문헌

1. Cho, S.Y., Oh, K.S. and Choi, B.S., 2000. "Study of Design Parameters for Designing an Axial Turbine Blade Geometry", ISORMAC-8 pp.222~228
2. Cohen, H, Rogers, G.F.C, Saravanamuttoo, H.I.H, 1993, "Gas Turbine Theory" Third edition, Longman Scientific & Technical
3. Stewart, W.L and Glassman, A.J. 1973, "Blade Design", 'Turbine Design and Application', Vol.2. NASA
4. Wilson, G.W. and Korakianitis, T., 1998, "The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines", 2nd edition Prentice Hall