

CFD 기반 Throughflow 기법을 이용한 저압 축류 터빈 성능 평가

최민석*† · 김대현** · 김동화***

Performance Evaluation of Low-Pressure Axial Turbine using CFD-based Throughflow Method

Minsuk Choi*†, Dae Hyun Kim**, Donghwa Kim***

Key Words : Throughflow(관통유동), Low pressure axial turbine(저압 축류 터빈), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

The CFD-based throughflow (TF) method was applied to assess the accuracy of predicting the performance of a low-pressure axial turbine. In comparison to commercial CFD analyses, the CFD-based TF accurately estimated the performance parameters such as the choking mass flow rate, expansion ratio and total-to-total efficiency for an initial axial turbine design within minutes. Evaluation against the performance test results for the final manufactured axial turbine revealed that the CFD-based TF yielded predictions of the mass flow rate, expansion ratio and efficiency with a maximum error of 1.61%. However, limitations of the CFD-based TF were identified in resolving the passage vortex and the tip clearance flow due to its characteristics using only a single computational cell in the pitchwise direction, leading to a local numerical error increase near 20% and 80% spans particularly influenced by these two flow features. Despite these constraints, the demonstrated accuracy suggests potential for integrating the CFD-based TF into the axial turbine design process for predicting the performance quickly.

1. 서 론

축류압축기나 축류 터빈 설계를 위해서는 일반적으로 유량, 압력비(또는 팽창비) 및 효율의 세 설계 인자가 필요하며, 1D/2D/3D 설계 및 성능 해석 과정을 거친다. 설계 인자를 토대로 1D 예비 설계를 진행하고 허브 및 케이싱 프로파일, 단수, 각 단 평균 반경에서의 유동각 등을 얻는다. 1D 설계안에 대해서 1D 평균반경 분석(Meanline analysis)을 진행하여 설계 회전수에서의 성능곡선을 도출하고 설계안이 목표로 하는 성능을 만족시키는지 1차적으로 확인한다. 그 후 평균반경에서의 유동각을 바탕으로 자유와류법(Free vortex method), 강제와류법(Forced vortex method) 또는 혼합와류법(Mixed vortex method)을 이용하여 허브로부터 케이싱까지 각 스펜에서 유동각을 결정한다. 이 유동각(또는 메탈각)을 이용하여 각 스펜에서의 블레이드 형상을 결정할 수

있으며, 자오면(Meridional plane) 상에서 Throughflow (이하 TF) 기법을 적용하거나, 아니면 각 스펜에서 2D 유동해석을 통해서 성능을 확인하고 블레이드 각도를 튜닝하는 과정을 거친다. 마지막으로, 각 스펜에서의 2D 블레이드 형상을 적층하여 각 단에서의 3차원 블레이드 형상을 도출하고, 3D CFD를 통해서 최종 성능을 확인하고 최적화하는 과정을 거친다.

앞에서 언급한 바와 같이 TF 기법은 각 스펜에서 유동각 또는 2D 블레이드 형상이 결정된 경우에, 설계된 축류형 유체기계의 성능을 계산하기 위해서 사용된다. 여러 단 각 스펜에서의 유동각 또는 메탈각을 튜닝하기 위해서, TF 기법은 수 분 내에 설계된 축류 유체기계의 성능을 계산하는 것을 목적으로 하고 있다. 일반적으로 연구자들이 언급하는 TF 기법은 Wu⁽¹⁾의 이론에 기반한 유선 곡률(Streamline curvature) TF 기법을 말하며, Smith⁽²⁾, Novak⁽³⁾ 및 Denton⁽⁴⁾에 의해서 정립되

* 명지대학교 기계시스템공학부(Myongji University)

** 한화에어로스페이스(Hanwha Aerospace)

*** 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

† 교신저자, E-mail : mchoi@mju.ac.kr

있고, 현재까지도 축류 유체기계 설계 과정에서 사용되고 있다⁽⁵⁾. 국내에서도 이 방법을 코드로 구현하여 이찬과 김형택⁽⁶⁾이 1단 축류 터빈 성능을 계산하였고, 김상조 등⁽⁷⁾은 다단 축류 터빈의 성능을 계산하였다. 최근에는 유선 곡률 TF 기법은 원심형 유체기계로 확장되었고⁽⁸⁾, 많은 TF 관련 상용 프로그램이 다양한 형태의 유체기계 설계에 적용되고 있다.

CFD에 기반한 TF 기법은 Spurr⁽⁹⁾에 의해서 처음 제시된 이후로 몇몇 모델이 개발되었으나, 유선 곡률 TF 기법에 비해서 많이 사용되지는 않았다. Denton^(10,11)은 단일 유로 3D CFD 해석에서 유선 및 스펠 방향의 격자는 그대로 유지하면서 피치 방향의 격자를 하나만 사용하는 방안을 제시하였고, 실제 유체기계 설계에 CFD 기반 TF 기법을 적용하였다. 최근 Ricci 등⁽¹²⁾은 CFD 기반 TF 기법의 정확도를 높이기 위해서 원주 방향으로 평균된 손실을 보정하는 방안을 제안하였다.

국내에서도 유선 곡률 TF 기법이 유체기계 설계 과정에서 대부분 사용되고 있지만, 이 연구는 CFD 기반 TF 기법을 저압 축류 터빈 설계 과정에 적용하여, 이 방법의 정확도 및 효율성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. CFD 기반 TF 해석 기법

2.1 MULTALL 코드

이 연구에서는 Denton⁽¹¹⁾의 MULTALL 코드를 이용하여 TF 해석을 수행하였는데, 이 코드는 Navier-Stokes 방정식을 외제적 시간 전진 기법을 사용하여 다단 유체기계의 3D 정상 유동을 해석하는 CFD 코드이다. 다단 유체기계에서 단일 유로로 구성된 계산 영역에 단일 블록 정렬 격자계를 사용하여 해석하며, 이 때문에 익단 형태를 핀치(pin) 타입으로 단순화하여 익단 누설 유동을 계산한다. 다단 유체기계에서의 정상 유동 해석을 위해서 각 익렬 사이의 경계면은 혼합경계면(Mixing plane)을 사용하며, 난류 점도 계산을 위해서는 혼합길이 모델 또는 Spalart-Allmaras 모델이 구현되었다. 유체기계 계산 영역 입구에서는 전압, 전온도 및 유동각을 경계조건으로 사용하고, 출구에서는 정압 조건을 사용한다. MULTALL 코드에 사용된 수치 기법 및 적용 사례는 Denton⁽¹¹⁾에서 확인할 수 있다.

2.2 CFD-기반 TF 기법의 특징

3D CFD 해석과 CFD 기반 TF 해석의 차이는 피치 방향의 공간을 충분한 격자수를 이용하여 나누는지 아니면 하나의 격자만 사용하여 구현하는지의 차이이다. CFD에서 사용되는 기법을 그대로 사용하기 때문에, CFD 기반 TF는 유동의 3차원 효과는 반영하지만 유로 내에서 발생하는 복잡한 유동

구조는 계산이 불가능하고, 이러한 유동들의 피치 방향으로 평균된 효과들은 일부 반영한다.

CFD 기반 TF 기법에서는 유선 곡률 TF 기법과 달리 손실 모델을 사용하지 않지만, 블레이드 표면에서의 발생하는 마찰손실을 구현하기 위한 마찰 계수는 사용한다. 충분한 손실 데이터가 축적된 기존 유체기계 형상과 유사한 설계안에 대해서는 유선 곡률 TF의 성능 예측은 아주 정확하지만, 기존 형상과 많은 차이를 가지는 새로운 형태의 유체기계 설계안에 대해서는 예측 정확도가 감소한다. 반면에 CFD 기반 TF는 손실 모델을 쓰지 않기 때문에, 새로운 형태의 유체기계 설계안에 대해서도 기존 유체기계와 비슷한 정도의 정확도를 유지하는 장점을 가진다.

마지막으로 CFD 기반 TF의 경우 블레이드 표면에 표면 격자를 가지기 때문에, 자오면에서의 유동 변수값 이외에 블레이드 표면에서의 압력값을 얻을 수 있고 이를 토대로 대략적인 블레이드 부하>Loading) 예측이 가능하다.

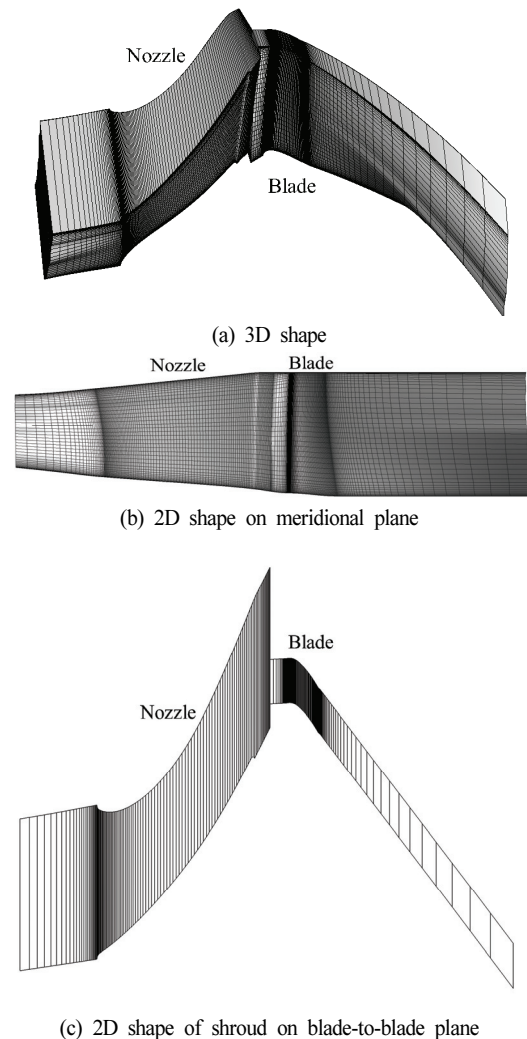


Fig. 1 Computational mesh for CFD-based throughflow analysis

3. CFD 기반 TF 해석 결과

이 연구에서 설계·제작된 저압 축류 터빈은 국내에서 개발되고 있는 소형항공기용 가스터빈 엔진의 부분품으로, 세부 사양은 공개하기 어렵다. 이 때문에, 설계 과정에서 CFD 기반 TF 해석을 적용한 사례를 소개하고 최종 설계안에 대해서는 시험 결과와 비교하여 해석 정확도를 확인하고자 한다.

3.1 저압 축류 터빈 설계 단계

상용 설계 프로그램을 이용하여 초기에 설계된 1단 저압 축류 터빈의 허브 및 케이싱 프로파일과 노즐 및 블레이드 형상을 이용하여 3D 계산 영역과 격자를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 노즐과 블레이드 익렬에서 각각 하나의 유로를 사용하였고, 블레이드에는 익단 간극이 핀치 형태로 구현되었다. 노즐 유로에는 10,800개의 노드(유선×피치×스팬, 120×2×45), 블레이드 유로에는 11,700개의 노드(유선×피치×스팬, 130×2×45)가 사용되었다. 참고로, Fig. 1(c)의 케이싱 표면 격자를 살펴보면, CFD 기반 TF에서는 피치방향으로 하나의 격자만 사용함을 확인할 수 있다.

저압 축류 터빈의 동일한 설계안에 대해서 TF 해석을 수

행하고, 상용 CFD 프로그램인 Ansys CFX 해석 결과와 비교하여 정확성을 확인하였다. CFX를 이용한 해석에서는 각 익렬 사이의 경계면은 Frozen-Rotor 조건을 이용하였고, 난류모델은 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. Fig. 2에는 두 방법을 이용하여 예측된 팽창비와 전압효율을 무차원 유량에 대해서 나타내었다. 각각의 경우에 대해서, 무차원 유량은 유량을 초킹 유량으로 나눈 값이며, 축류 터빈에서 TF에 의해서 예측된 초킹 유량은 CFX해석 결과에 비해서 2.62% 작다. 축류 터빈의 팽창비 곡선과 효율 곡선은 두 방법 모두 잘 일치하며, CFX 예측 결과와 비교하면, TF는 팽창비는 약 3% 정도, 전압효율은 약 1% 정도 크게 예측하였다. TF가 CFX 결과보다 초킹 유량이 작게 예측되고 고유량에서 효율 곡선 경향이 달라지는데, 이러한 결과는 TF 해석에서는 피치방향으로 하나의 격자를 사용하기 때문에 초킹이 발생할 때 노즐 목에서 충격파를 실제와 다르게 예측하기 때문으로 판단된다.

Fig. 3에는 TF와 CFX에 의해서 예측된 스펀 방향의 전압 및 마하수 분포를 노즐 상류 및 하류, 그리고 블레이드 하류에서 비교하였다. 입구 경계조건에서 동일한 전압, 전온도

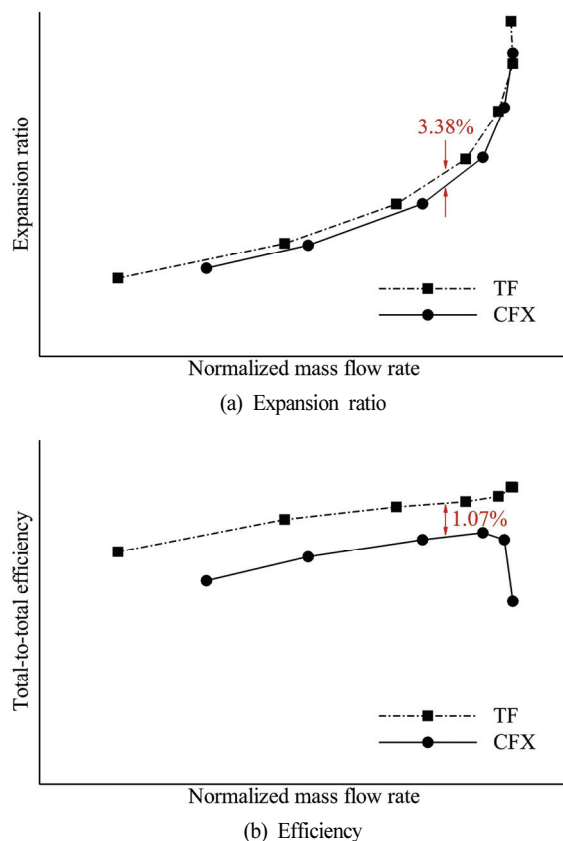


Fig. 2 Performance curves of low pressure axial turbine

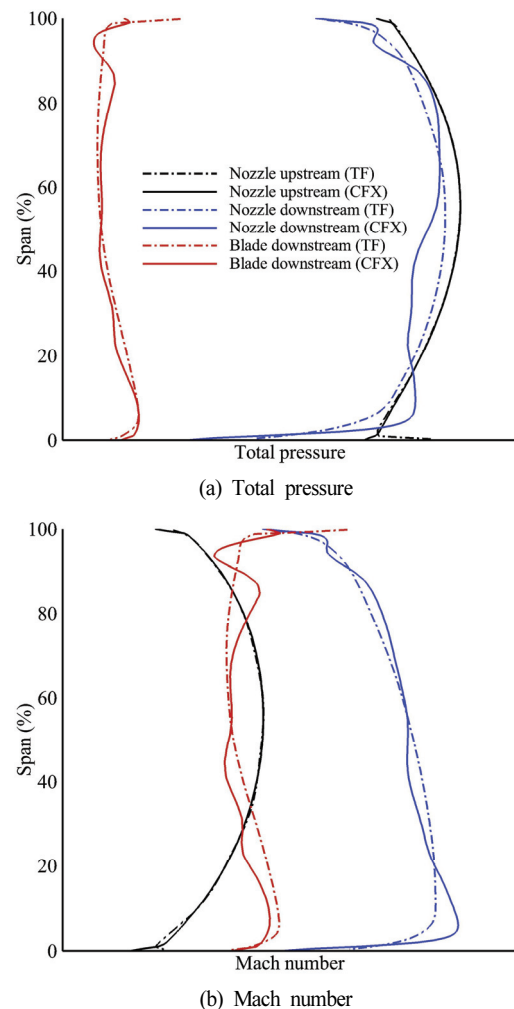


Fig. 3 Spanwise distribution of flow properties

및 유동각 분포를 사용하기 때문에 노즐 상류에서는 스펠에 따른 전압과 마하수 분포가 일치한다. 전압분포를 먼저 살펴 보면, 노즐 하류(또는 노즐과 블레이드 사이) 40% 스펠에서 TF와 CFX 예측 값 사이에 약 3.93% 차이가 발생하고 블레이드 하류에서는 85% 스펠에서 약 3.65%의 차이가 발생하지만, 스펠에 따른 전체적인 전압분포는 잘 일치한다. 마하수 분포에서도 노즐 하류의 5% 스펠에서 약 7.74%, 블레이드 하류의 85% 스펠에서 약 14.07%의 차이가 발생하지만, 전체적인 마하수 분포는 잘 일치한다.

설계과정에서 저압 축류 터빈에 대한 TF와 CFX 해석 결과의 비교를 통해서, Fig. 3의 스펠에 따른 유동 분포에서는 국부적으로 약 10% 정도의 오차가 발생할 수 있지만, Fig. 2의 성능 곡선에서는 약 3% 정도의 오차가 발생함을 확인하였다. 이러한 오차는 TF가 피치방향으로 하나의 격자를 사용하므로 저압 축류 터빈 내부의 복잡한 와류를 구현할 수 없기 때문에 나타난다. CFD 기반 TF 해석은 설계된 유체기계의 성능을 빠르게 계산하는데 목적이 있으므로, 이 연구에서 사용하는 방법은 설계 초기 과정에서 사용해도 될 정도의 정확도를 가지고 있다고 판단된다. 참고로, TF 계산을 활용할 경우 설계 형상으로부터 설계점의 성능을 확인하는데 최대 10분 정도의 시간이 소요된다. 반면, 격자생성 등의 전처리 시간을 제외한 CFX 해석 시간은 사용하는 격자수와 계산용 컴퓨터의 성능에 따라 달라지지만, 이 연구에서는 설계점에서 해석이 수렴되기까지 2시간 정도 걸렸다.



Fig. 4 Low pressure axial turbine and test facility

3.2 저압 축류 터빈 시험 및 TF 검증

최종 설계 확정된 저압 축류 터빈을 제작하여 Fig. 4와 같이 고도에 따른 공기 특성을 구현할 수 있는 챔버 내에서 성능 및 유동 측정을 수행하였다. 여러 운전점에서 축류 터빈의 유량, 팽창비 및 효율을 측정하였고, 노즐 상류와 블레이드 하류에서 스펠 방향 전압 및 전온도 분포도 측정하였다.

시험 테스트한 축류 터빈 형상 및 설계점에서의 운전조건을 이용하여 TF의 정확도 검증을 위한 성능 및 유동 분석을 진행하였다. Fig. 5에서는 TF에 의해서 예측된 입구와 출구에서의 스펠 방향 전압 및 전온도 분포를 나타내었다. TF에 의해 예측된 저압 축류 터빈 입구 전압 및 전온도 분포는 실험값과 잘 일치하는데, 이것은 실험에서 측정된 스펠 방향 분포를 TF 계산이 이용했기 때문이다. TF에 의해서 예측된 동익 하류에서의 전압분포는 실험 측정값과 정확하게 일치

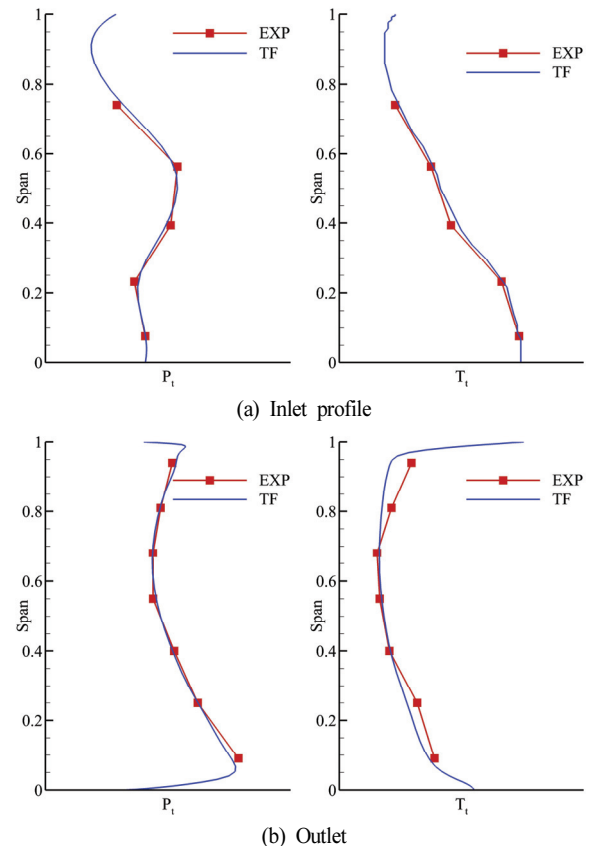


Fig. 5 Comparison of spanwise flow properties between experiment and TF

Table 1 Performance difference between experiment and TF at design condition

Performance parameter	Error (%)
Mass flow rate	0.59
Expansion ratio	0.20
Total-to-total efficiency	1.61

하는데, 최대 오차는 10% 스패에서 약 0.88%이다. 반면에, TF가 예측한 전온도 분포는 실험값과 전체적으로 잘 일치하지만 20% 스패 및 90% 스패에서 최대 1.91%의 오차를 가지는데, 이것은 TF가 피치 방향으로 하나의 격자 셀만 사용하기 때문에 터빈 유로 내에서 발생하는 유로 와류(Passage vortex) 및 익단 누설 유동을 구현할 수 없기 때문으로 판단된다. 추가적으로, Table 1에는 저압 축류 터빈 설계 운전점에서 실험을 통해서 측정한 데이터와 TF에 의해서 예측된 결과의 오차를 비교하였다. TF는 유량은 0.59%, 팽창비는 0.20% 및 전압효율은 1.61%의 오차 내로 축류 터빈의 설계 운전 성능을 예측하였다.

Fig. 6에는 자오면 상에서의 정압 및 마하수 분포를 나타내었는데, 그림 상에서 검은 점선은 노즐과 블레이드의 전연(Leading edge) 및 후연(Trailing edge) 위치를 표시한다. 자오면 상의 노즐 50% 코드 이후 허브 근처와 블레이드 70% 코드 이후 전체 스패에서 압력이 감소하면서 마하수가 증가하여 초음속 상태가 되는데, 이 부분에서 초킹이 발생함을 확인할 수 있다.

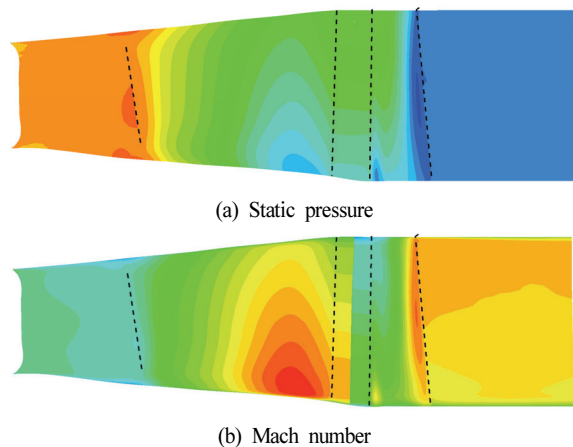


Fig. 6 Static pressure and mach number distribution on meridional plane

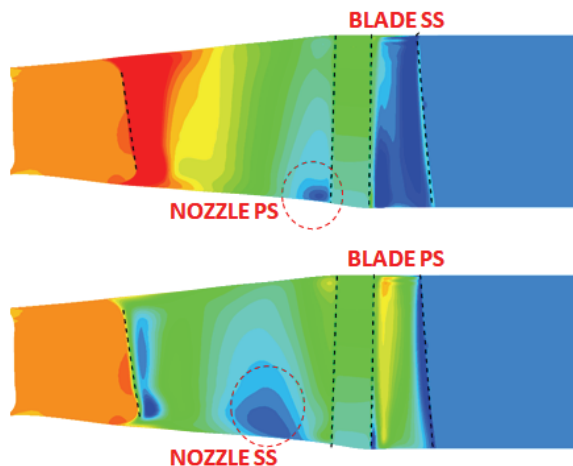


Fig. 7 Surface static pressure predicted by TF

앞서 언급한 바와 같이 CFD 기반 TF 기법은 노즐과 블레이드 표면에도 격자점이 있어 자오면에서의 압력뿐 아니라 노즐 및 블레이드 표면 압력을 확인할 수 있다⁽¹¹⁾. Fig. 7에는 노즐과 블레이드 표면에서의 압력을 나타내었는데, 노즐 압력면 및 흡입면 허브 근처에서 압력이 낮은 영역이 발생하고 흡입면에서 압력이 더 낮아지는데, 이것은 노즐 흡입면에서 유동이 가속되면서 허브 근처의 노즐 목(Throat)에서 부분적으로 초킹이 발생하는 것으로 판단된다. 블레이드 표면 압력을 살펴보면 흡입면에서는 유동의 가속으로 인한 낮은 압력 영역이 전체적으로 관찰되지만, 압력면에서는 높은 압력을 유지하다가 블레이드 후연 근처에서 갑자기 낮은 압력 영역이 관찰되는데, 이것은 앞서 말한 것처럼 블레이드 전체 스패에서 초킹이 발생하기 때문이다.

4. 결 론

이 논문에서는 CFD 기반의 TF 기법을 저압 축류 터빈 설계 과정에 적용하여 설계된 터빈의 성능을 파악하고, 최종 설계·제작된 축류 터빈에 대해서도 성능 및 유동 해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였다. 이를 통해 얻을 수 있는 결과는 아래와 같다.

- 1) 상용 CFD 해석과 비교하여 축류 터빈 설계 과정에 TF를 사용할 경우, 축류 터빈의 전체적인 성능은 약 3% 오차 내로 예측할 수 있는 것으로 확인된다. 다수의 설계안이 도출되는 초기 설계 과정에서 이 정도의 정확도로 수 분 내에 축류 터빈의 설계점의 성능을 확인하여, 설계에 피드백을 할 수 있는 것은 TF의 큰 장점이라고 판단된다.
- 2) 최종 설계·제작된 축류 터빈의 성능 시험 결과와 비교하여 TF는 설계점에서의 축류 터빈 유량, 팽창비 및 전압효율을 최대 1.61% 오차 내로 정확하게 예측하였다. CFD 기반 TF에서는 손실 모델을 사용하지 않기 때문에, 이 정도의 정확도는 CFD 기반 TF가 새로운 타입의 유체기계의 설계 운전 성능을 파악하는 데에도 사용될 수 있음을 의미한다.
- 3) CFD 기반 TF에서는 피치 방향으로 하나의 격자 셀을 사용하기 때문에 유로 내에서 발생하는 유로 와류나 익단 누설 유동 등을 파악할 수 없다. 따라서, 이러한 유동의 영향을 크게 받는 20% 스패 및 80% 스패 근처에서는 국부적으로 스패 방향 유동 특성 예측의 오차가 커질 수 있다.
- 4) 결론적으로, 축류 터빈의 초기 설계 과정에서 CFD 기반 TF는 수용할 수 있을 정도의 정확도로 빠르게 성능을 예측하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC19007GD).

Reference

- (1) Wu, C. H., 1952, "A General Theory of Three Dimensional Flow in Subsonic, and Supersonic Turbomachines of Axial, Radial and Mixed-Flow types," NACA-TN-2604.
- (2) Smith, L. H., 1966, "The Radial-Equilibrium Equation of Turbomachinery," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 88, No. 1, pp. 1~12.
- (3) Novak, R. A., 1967, "Streamline Curvature Computing Procedures for Fluid-Flow Problems," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 89, No. 4, pp. 478~490.
- (4) Denton, J. D., 1978, "Throughflow Calculations for Transonic Axial Flow Turbines," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 100, No. 2, pp. 212~218.
- (5) Petrovic, M. V. and Wiedermann, A., 2013, "Through-flow Analysis of Air-Cooled Gas Turbines," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 135, No. 6, p. 061019.
- (6) Lee, C. and Kim, H. -T., 1996, "Applications of Secondary Flow and Spanwise Mixing Models to the Through-Flow Analysis of Axial Flow Turbine," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 24, No. 3, pp. 19~27.
- (7) Kim, S., Kim, K. and Son, C., 2018, "A Study on the Through-Flow Analysis for a Multi-Stage Axial Turbine Considering Leakage Flows," Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 22, No. 5, pp. 1~12.
- (8) Casey, M. and Robinson, C., 2010, "A New Streamline Curvature Throughflow Method for Radial Turbomachinery," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 132, No. 3, p. 031021.
- (9) Spurr, A., 1980, "The Prediction of 3D Transonic Flow in Turbomachinery using a Combined Throughflow and Blade-to-Blade Time Marching Method," International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 2, No. 4, pp. 189~199.
- (10) Denton, J. D., 1990, "The Calculation of Three Dimensional Viscous Flow Through Multistage Turbomachines," ASME Paper 90-GT-19.
- (11) Denton, J. D., 2017, "MULTALL—an Open Source, CFD Based, Turbomachinery Design System," ASME Paper GT2017-63993.
- (12) Ricci, M., Pacciani, R., Marconcini, M. and Arnone, A., 2018, "Secondary Flow and Radial Mixing Modelling for CFD-based Through-Flow Methods: an Axial Turbine Application," Energy Procedia, Vol. 148, pp. 218~225.