

1단 터빈에서 축간격 변화가 비정상 이차유동 및 성능에 미치는 영향

박준영*·백제현**

The effects of axial spacing on the unsteady secondary and performance in one-stage axial turbine

JunYoung Park* and JeHyun Baek**

Keywords : Unsteady Secondary Flow(비정상유동), Performance(성능), Stator/Rotor Interaction(정익/동익 상호작용)

Abstract

Flow through turbomachinery has a very complex structure and is intrinsically unsteady. Especially, recent design trend to turbomachinery with short axial spacing makes the flow extremely complex due to the interaction between stator and rotor. Therefore, it is very necessary to clearly understand the complex flow structure to obtain the high efficiency turbomachinery. So, in this paper, the effects of axial spacing on the unsteady secondary flow and performance in the one stage turbine are investigated by three-dimensional unsteady flow analysis. The three-dimensional solver is parallelized using domain decomposition and Message Passing Interface(MPI) standard to overcome the limitation of memory and save the CPU time in three-dimensional unsteady calculation. A sliding mesh interface approach has been implemented to exchange flow information between blade rows.

1. 서론

Duhamm과 Came[1]은 항공기 엔진 터빈의 전압손실의 1/3 이 끝벽 가까이에서의 2차 유동에 의해 발생함을 보였다 이와 같이 다단 터보기계 내에서 큰 손실을 발생시키는 이차유동 특성에 관한 연구는 지금까지 주로 실험에 의해 수행되어져 왔다. Binder[2]는 터빈 동익과 정익에서 발생한 2차 와류와의 상호작용에 의하여 난류가 생성됨을 보였다. Sharma 등[3,4]은 실험을 통하여 1.5단 터빈에서 비정상성이 하류 동익에서의 이차유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. Josly과 Dring[5]는 실험을 통하여 1.5단 저속 터빈에서의 반경방향 유동특성을 보였다. 동익에서의 비정상 유동 특성에 관한 연구가 Zeschky와 Gallus[6]에 의해 수행되었다. 그들은 실험을 통하여 동익에서의 이차유동과 후류 그리고 출구 유동각이 불균일한 정익 출구 유동과 주기적인 정익과 동익의 상대적인 움직임에 크게 영향을 받음을 입증하였다. Gallus, Zeschky 그리고 Hah[7]는 실험결과와 계산 결과의 비교를 통하여 터빈 출구단에서의 정확한 이차 유동장을 해석하기 위해서는 비정상 효과와 3차원 효과를 고려한 수치해석이 수행되어져한다는 것을 보였다. Zaccaria와 Lakshminarayana[8], Zaccaria등[9]은 일련의 실험을 통해 터빈 안내깃내와 출구에서의 일련의 실험을 통하여 2차 유동의특성을 조사하였다. Fan과 Lakshminarayana[10]는 정익 후류와 동익, 정익에서 발달한 2차유동의 특성에 관한 수치해석을 수행하였다. 많은 상세한 실험과 수치해석들이 이차 유동의 발생이유를 보다 잘 이해하기 위해 수행되었으나 아직 미비하다. 특히, 실제 유동이 익렬의 상대적인 움직임에 의하

여 비정상 유동이지만, 이차 유동 특성에 미치는 비정상 유동의 영향은 아직 충분히 인지되지 못하였다. 이것은 실험을 통한 비정상 유동장 측정의 어려움과 3차원 비정상 유동 해석에 있어서 소요되는 계산시간과 메모리의 한계에 기인한다. 그러므로, 본 연구에서는 보다 효율적으로 3차원 비정상 유동을 계산하기 위해 병렬해석기법을 도입하였으며, 이를 바탕으로 1단 터빈내에서의 이차유동의 분포 특성과 순간효율의 관계, 축간격의 변화가 이차유동의 특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

압축성 방정식에 대한 가장 일반적인 운동 방정식의 표현 방법인 연속 방정식과 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식으로 구성된 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 압력은 이상기체상태 방정식으로부터 구해지며, 점도는 층류와 난류 점도의 합으로 나타내어지며 층류 점도는 Sutherland의 식으로 구하여지며, 난류 점도는 혼합길이법을 기본 개념으로 하는 2층 대수 모델인 Baldwin-Lomax[11] 대수 모델을 이용하여 구하였다.

2.2 수치해석기법

지배 방정식은 유한체적법으로 공간이산화되었으며 정확한 비정상 상태의 해를 얻기 위해 2차의 내재적 오일러 시간전진법을 사용하였다. 비점성 플럭스에 대해 풍상차분적 TVD 기법인 Roe[12]의 FDS(Flux Difference Splitting)기법을 사용하고, 고차의 정확도를 유지하기 위해 MUSCL기법을 이용하였다. 점성 플럭스에 대해서는 확산이나 소멸 현상에 적절한 2차의 중앙 차분법을 사용하였다.

* 포항공과대학교 기계공학과, jhbaek@postech.ac.kr

** 포항공과대학교 대학원, jypark@postech.ac.kr

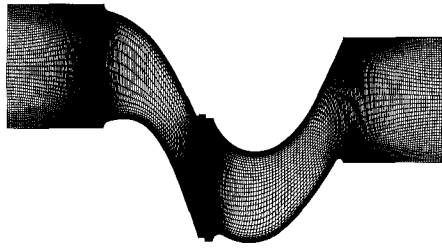


Fig. 1 Grid system at 50% span

2.3 경계조건

입구경계에서 Riemann 불변량들이 정의 되어지며 입구경계에서의 값들은 이들 Riemann 불변량들을 이용하여 구해진다. 출구에서는 중앙 스펠지점에 고정된 정압이 주어지며 허브와 케이싱 쪽으로 반경방향 평행 방정식으로부터 스펠방향으로의 정압분포가 구해진다. 다른 변수들은 내부로부터 외삽되어진다. 벽에서는 no-heat flux 조건으로부터 밀도를 계산하였고, 속도에 대해서 점착조건(no-slip condition)을 주었다. 압력은 벽에서의 플릭스 흐름이 존재하지 않음을 이용하여 유도한 압력보정식에 점착조건을 더해서 내부값으로부터 외삽하였다. 주기 경계면은 입구 경계면에서 블레이드 앞전까지와 블레이드 뒷전에서 출구 경계면까지이다. 주기 경계면에서는 가상 격자점을 이용하여 서로 상대되는 변수들의 서로 상대되는 주기 경계면으로부터 결정된다.

2.4 해석 1단 터빈

해석 대상인 UTRC (United Technology Research Center) LSRR (large scale rotating rig) 터빈은 실제 1.5단으로 구성되어 있으며 1단과 1.5단 환경에서 Joslyn과 Dring[5], Dring등[13,14], Sharma 등[3,4]에 의해 많은 실험이 수행되었다. 본 연구에서는 전체 단중 1단에 대한 수치해석을 수행하였다. 1단 터빈은 2차원 정익/동익 상호작용하에서의 유동해석을 위한 코드 검증용으로 많은 연구자들에 의해 자주 이용되었다. 본 연구에서의 3차원 해석 코드의 검증도 UTRC 1단 터빈에서의 해석결과와 실험결과와의 비교를 통하여 수행되었으며 동일한 터빈에서 이차유동의 특성도 조사되었다.

2.5 격자계

본 연구에서는 계산의 편리를 위하여 정익/동익의 실제수 22/28을 Rai등[15]에 의해 제안된 익형 재구성 방법을 이용하여 동익을 28/22로 확대하여 익렬비 1:1에 대하여 계산을 수행하였다. 이때 동익의 블록 효과를 일정하게 유지하기 위하여 스펠길이는 고정하고 솔리디티(Solidity)를 유지하도록 확대하였다. 또한, 격자생성과 계산의 단순화를 위하여 동익에서의 팁 간극을 고려하지 하지 않았다.

계산 격자는 H-형태의 격자계를 이용하여 만들어졌다. 격자의 수는 정익과 동익 통로에 대하여 동일하게 축방향으로 128개, 피치방향으로 51개 그리고 스펠방향으로 51개의 격자가 사용되었다. Figure 1 은 반경방향 50% 단면에서의 격자계를 보여준다.

3. 결과

Fig. 2는 축간격 변화에 따른 전효율의 변화를 보여준다. 계산은 축간격 10%, 15%, 30% 그리고 50%에 대하여 이루어졌

다.

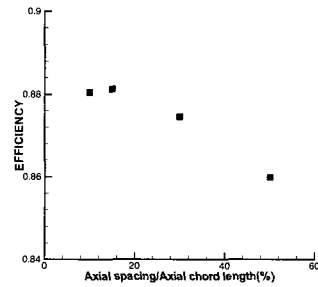


Fig. 2 Total-to-total efficiency due to the variation of axial spacing

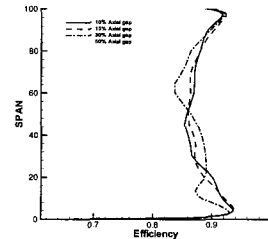


Fig. 3 Spanwise distribution of total-to-total efficiency due to the variation of axial spacing

Fig. 2에서 보여지듯이 최고 효율은 축간격 15%에서 발생하며 축간격 50%에서 효율이 가장 낮다.

Fig. 3은 전효율의 반경 방향 분포를 보여준다. 축간격 10%와 15%에서 반경방향 효율분포가 그리고 축간격 30%와 50%에서의 반경방향 효율분포가 매우 유사하다. 이러한 결과로부터 상세한 순간 효율과 2차유동의 분포 특성은 축간격 15%와 50%에 대하여 조사되었다.

Fig. 4는 축간격 15%와 축간격 50%에서 한 주기를 12등분했을 때 각 순간 전효율을 보여준다. 축간격이 증가함에 따라 최대효율은 감소하고, 최소효율은 증가하면서 최대효율과 최소효율의 차는 줄어든다. 축간격 15%인 경우 순간 최대 효율은 4/12 주기, 순간 최소 효율은 7/12 주기에서 발생한다. 축간격 50%인 경우 최대 효율은 10/12 주기에서 발생하고 최소 효율은 4/12 주기에서 발생한다.

Fig. 5는 축간격 15%와 축간격 50%에서 반경방향으로의 순간 효율의 분포를 보여준다. Fig. 4에서 예측할 수 있듯이 축간격이 증가함에 따라 반경방향 효율의 변화 역시 감소한다. 또한, 축간격의 변화에 관계없이 반경방향에 있어 효율의 변화는 50% 스펠 아래 영역에서 크게 발생한다.

Fig. 6은 축간격 15%와 50%에서 동익 앞전에서 코드길이의 7% 상류에 위치한 단면에서의 이차유동 속도벡터와 엔트로피 분포이다. 이때의 엔트로피의 분포는 상류 정익에서 발생한 후류와 통로와류의 유입 위치를 보여준다. 이차속도 성분은 50% 스펠지점에서 요각(yaw angle)방향으로 하류에서 상류로 속도 성분을 투영했을 때 얻어지는 속도 성분이다.

엔트로피 분포에서 축간격 15%에서는 후류와 2차유동이 뚜렷이 구분되어지나, 축간격 50%에서는 후류영역과 2차유동 영역의 혼합(mixing)에 의하여 두 영역의 뚜렷한 구분이 나타나지 않는다. 그러므로, 축간격 15%에서는 정익 통로 케이싱쪽에 발생한 반시계 방향으로 회전하는 통로 와류가 동익 통로 내로 유입되며, 후류영역에서는 허브쪽을 향한 반경방향 속도 성분이 유지된채 동익 통로내로 유입된다. 축간격 50%에서는

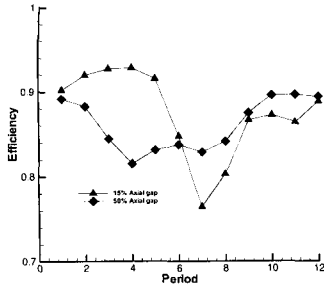


Fig. 4 Instantaneous efficiency due to the variation of axial spacing

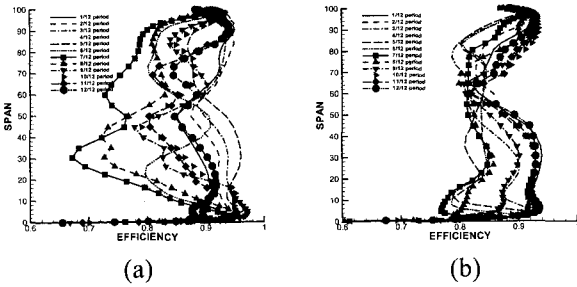


Fig. 5 Spanwise distribution of instantaneous efficiency (a) at axial spacing 15% (b) at axial spacing 50%

축간격 15%에서 만큼 뚜렷한 통로와류가 나타나지 않으며 후류영역에서는 허브쪽을 향하는 반경방향 속도성분이 매우 약해졌다. 축간격에 관계없이 최소효율이 발생하는 순간 정익에서 발생하는 후류의 흡입면쪽 허브부근에서 반시계 방향으로 움직이는 이차유동이 형성된다.

축간격에 관계없이 최소 효율이 발생하는 순간에 동익 통로내로 유입되는 후류와 이차유동은 동익의 중앙 피치영역에서 유입된다. 최대 효율은 상류에서 발생한 후류와 2차유동 영역이 동익 앞전근처로 유입되는 순간이다. Shrama 등은 실험을 통하여 앞쪽 익렬에서 발생한 후류와 이차유동이 동익의 가운데 피치 영역으로 유입되어 동익과 상호작용이 발생하지 않는 순간을 최소상호작용, 동익 앞전쪽으로 유입되어 상호작용이 발생하는 순간을 최대상호작용으로 명하였다. 본 연구결과에서 최대 상호작용이 발생하는 순간 가까이에서 순간 효율이 높고, 최소 상호작용이 발생하는 순간 가까이에서 순간 효율이 낮다.

Fig. 7은 축간격 15%와 50%에서 동익 뒷전에서 코드길이의 5% 하류에 위치한 단면에서의 이차유동 속도벡터분포이다. 이차속도 성분은 50% 스패지점에서 요각(yaw angle)방향으로 하류에서 상류로 속도 성분을 투영했을 때 얻어지는 속도 성분이다.

축간격이 증가함에 따라 동익 출구 단면에서 나타나는 통로와류의 크기도 증가한다. Fig. 6에서 보여지듯이 최대 효율이 발생하는 순간에는 정익에서 발생한 후류와 이차유동 영역이 동익 앞전과 상호작용을 하며 동익 통로내로 균일한 유동장이 유입되면서 동익 출구 단면에서는 2개의 통로 와류가 발생한다. 그러나, 최소 효율이 발생하는 순간 정익에서 발생한 후류와 이차유동이 동익 통로 중앙 영역으로 유입되면서 동익 통로내에서 발생하는 이차유동에 영향을 미치게 된다. 즉, 축간격 15%인 경우에는 Fig. 6에서 보여지듯이 최소효율 순간 후류 중심부근에서의 허브쪽을 향하는 반경방향 속도 성분과

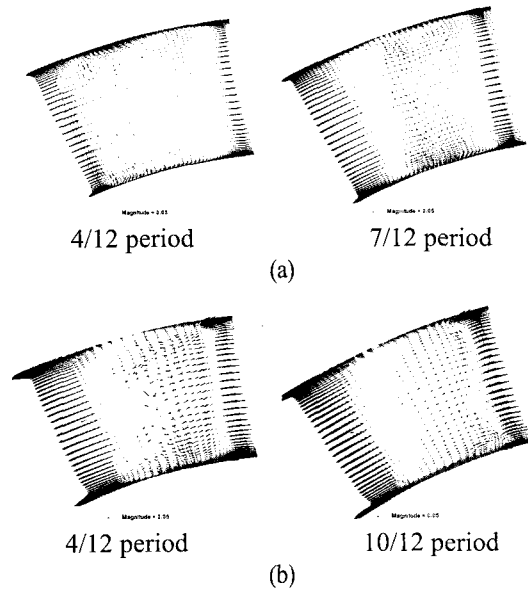


Fig. 6 Instantaneous secondary velocity vector in the plane 7% upstream of rotor: (a) at axial spacing 15% (b) at axial spacing 50%

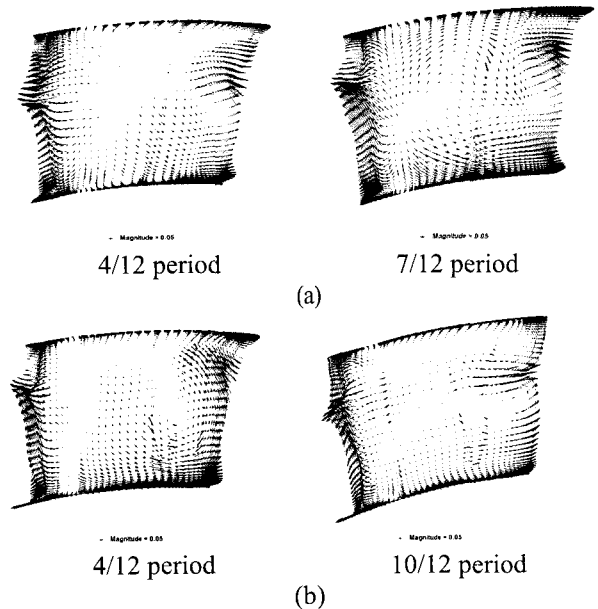


Fig. 7 Instantaneous secondary velocity vector in the plane 5% downstream of rotor: (a) at axial spacing 15% (b) at axial spacing 50%

케이싱 부근에 존재하는 통로와류의 유입에 의해 동익 출구단면에서 2개의 통로와류 모두 매우 작아지며 허브쪽을 향하는 큰 반경방향 속도분포가 존재한다. 이러한 이차유동의 분포형태가 Fig. 5(a)에서 보여지듯이 반경 반향에서의 효율의 큰 감소를 유발한다. 축간격 50%에서는 허브쪽에서 발생한 통로와류의 크기는 증가하고 케이싱쪽에서 발생한 통로와류의 크기는 줄어든다. 이것은 동익 통로내로 유입되는 후류 영역에서 뚜렷한 허브쪽을 향하는 반경방향 속도성분이 존재하지 않고 허브쪽에서 반시계 방향으로 움직이는 이차유동에 의해 동일한 방향으로 움직이는 허브쪽 통로와류의 크기는 증가하는 반면 케이싱쪽 통로 와류의 크기는 줄어들며 이러한 와류의 크기 변화가 반경 방향에서의 효율의 변화를 유발함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 축간격의 변화가 1단 터빈의 성능 및 통로 와류에 미치는 영향을 파악하기 위하여 1단 터빈에 대한 비정상 점성 해석을 수행하였다. 3차원 해석 코드는 계산시간을 줄이기 위하여 영역분할방법과 MPI 라이브러리를 이용하여 병렬화 하였으며 정익과 동익의 경계면에서 미끄럼 격자계와 면적에 기반한 내삽기법을 이용하여 익렬사이의 자료교환을 수행하였다. 축간격이 증가함에 따라 순간효율의 크기 변화는 줄어들며, 축간격의 변화에 관계없이 정익 후류와 동익이 최대 상호작용 직후에 순간 효율이 높으며, 최소 상호작용 시점 근처에서 순간 효율은 낮다. 이러한 순간 효율의 변화는 정익 통로내에서 발생하는 통로와류와 동익 통로에서 발생하는 통로와류의 상호작용 그리고 정익 후류와 동익 통로와류의 상호작용에 기인한다. 이러한 상호작용으로 인해 이차유동의 분포가 1단 터빈의 반경방향 효율 변화에 영향을 미친다. 또한, 축간격의 변화에 의해 동익 통로내로 유입되는 2차유동의 분포 형태가 달라지며 이러한 유입유동의 차이는 동익 출구단면에서의 이차유동 분포에 변화를 초래한다.

참고문헌

- [1] Dunham, J. and Came, P. M., 1970, "Improvements to the Ainley-Mathison Method of Turbine Performance Prediction," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 92, pp. 252-256.
- [2] Binder, A., 1985, "Turbulence Production Due to secondary Vortex Cutting in a Turbine Rotor," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 107, pp.1039-1046.
- [3] Sharma, O. P., Butler, T. L., Joslyn, H. D., and Dring, R. P., 1985, "Three-Dimensional Unsteady Flow in an Axial Flow Turbine," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-38.
- [4] Sharma, O. P. et al., 1988, "Rotor-Stator Interaction in Multi-Stage Axial Flow Turbines," AIAA-88-3013.
- [5] Joslyn, H. D., and Dring, R. P., 1992, "Three-Dimensional Flow in an Axial Turbine:Part 1-Aerodynamic Mechanisms." *Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 61-70.
- [6] Zeschky, J., Gallus, H. E., 1993, "Effects of Stator Wakes and Spanwise Nonuniform Inlet Conditions on the Rotor Flow of an Axial Turbine Stage," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 115, pp. 128-136.
- [7] Gallus, H. E., Zeschky, J., and Hah, C., 1994, "Endwall and Unsteady Flow Phenomena in an Axial Turbine Stage," ASME paper 94-GT-143.
- [8] Zaccaria, M., and Lakshminarayana, B., 1995, "Investigation of Three Dimensional Flowfield at the Exit of a Turbine Nozzle," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 1, pp. 56-63.
- [9] Zaccaria, M., Ristic, D., and Lakshminarayana, B., 1996, "Three-Dimensional Flow Field in a Turbine Nozzle," Vol. 12, No. 1, pp. 974-983.
- [10] Fan, S., and Lakshminarayana, B., 1996, "Time-Accurate Euler Simulation of Interaction of Nozzle Wake and Secondary Flow with Rotor Blade in an Axial Turbine Stage Using Nonreflecting boundary Conditions," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 663-678.
- [11] Baldwin, B. S., Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-257.
- [12] Roe, P. L., 1981, "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes," *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp.357-372.
- [13] Dring, R. P., Joslyn, H. D., Hardinand, L. W., Wangner, J.H., 1982, "Turbine Rotor-Stator Interaction," *J. of Engineering for Power*, Vol. 104, pp. 729-742.
- [14] Dring, R. P., and Joslyn, H. D., 1983, "The Relative Eddy in Axial Turbine Rotor Passages," ASME paper 83-GT-22.
- [15] Rai, M. M., 1989, "Three-Dimensional Navier-Stokes Simulations of Turbine Rotor-Stator Interaction, Part I : Methodology; Part II: Results," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 5, pp. 307-319.