

충동형 초음속 터빈의 노즐-로터 축간극에 따른 성능변화 연구

정수인* · 김귀순** · 정은환***

Numerical Study of The Nozzle-Rotor Axial Gap Effect on the Supersonic Turbine Performance

Soojin Jeong* · Kuisoon Kim** · Eunhwan Jeong***

ABSTRACT

We performed three-dimensional CFD analysis to investigate the effect of the nozzle-rotor axial gap of a partial admission supersonic turbine on the stage performance and the flow field. The computations are conducted for five axial gaps using flow analysis program, FLUENTTM. The results show that the axial gap between nozzle and rotor give the effect on the mass flow rates of tip leakage and the flow angle at the rotor outlet.

초 록

부분흡입형 초음속 터빈의 노즐과 1단 로터 사이의 축방향 간극이 터빈의 단 성능과 유동장에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 터빈에 대한 3차원 유동해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 상용 유동해석 프로그램 FLUENTTM를 사용하였으며 다섯 가지 경우의 축간극에 대해 계산을 하였다. 노즐-로터 축간극이 팁 누설 유량의 증가와 로터 출구의 유동각에 영향을 주는 것을 확인하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Supersonic Turbine(초음속 터빈), Nozzle-rotor Axial Gap(노즐-로터 축간극), Tip Leakage (팁 누설), Turbine Performance(터빈 성능)

1. 서 론

액체로켓엔진에 적용되는 터보펌프용 터빈으로는 시스템 특성상 소형, 경량이면서 높은 비출력을 낼 수 있는 초음속 충동형 축류터빈이 주

로 사용된다. 축류터빈은 정지부인 노즐과 회전부인 로터로 이루어져 있기 때문에 상대적인 움직임을 가능하게 해주는 축간극이 반드시 필요하다.

그러나 이 간극은 작동유체의 누설이 일어날 수 있는 주 유동통로가 되고 적지 않은 전압력 손실이 축간극에서 일어나는 것으로 알려져 있기 때문에 노즐-로터 사이의 축간극이 터빈의 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 여러 연구자들에게 의해 수행되어왔다.

* 부산대학교 부품소재산업협력연구소

** 부산대학교 항공우주공학과

*** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹
연락처, E-mail: soojin@pusan.ac.kr

일반적으로 초음속 충동형 축류터빈은 축간극이 커질수록 로터입구 유동각의 변화나 틱간극 손실의 증가 등으로 효율이 저하된다고 알려져 있다[1].

정은환 등은 초음속 충동형 터빈에서 축간극이 터빈 효율에 미치는 영향을 조사하여 간극이 커질수록 효율이 급격히 감소하는 구간이 있음을 관찰하였다[2]. Grönman은 터보차저용 초음속 터빈에서 비교적 큰 축간극의 경우에 대해 효율과의 관계를 연구하였는데 축간극이 커질수록 로터 출구 유동각을 증가시키고 터빈 효율이 비선형적으로 낮아진다고 밝히고 있다[3]. 반면 Gorrell 등은 로터 앞전의 충격파와 스테이터의 후류가 상호작용을 하기 때문에 천음속 압축기에서 축간극이 작아질수록 유량, 압력비, 효율 모두 나빠졌다고 보고하고 있다[4].

여러 문헌들에서 살펴본 바와 같이 현재까지는 상반된 결과의 연구들이 존재하고 있고 아직 명확하게 이론적으로 혹은 실험적으로 정립되어 있지 않다.

본 연구에서는 특히 부분흡입형 초음속 충동형 축류터빈에 대해서 3차원 전산해석을 수행하여 노즐-로터 사이의 축간극이 터빈 단(stage) 성능과 유동장에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 계산 조건

속도복합형 2단 초음속 축류터빈으로 설계된 터빈 중 1단부분이 계산에 사용되었다. 터빈의 각 부분에 대한 도식적인 그림이 Fig. 1에 나와 있다. 총 21개의 직사각 단면 초음속 노즐과 100개의 로터로 이루어져 있다. 로터에는 날개 끝단에서의 누설을 방지하기 위해 슈라우드를 장착하였다. 로터 틱간극은 모든 계산 경우에 대해 3mm로 일정하게 주었다. 로터블레이드 높이의 터빈의 압력비는 19.5, 입구온도는 373K로 주었으며 로터의 회전수는 6147.5 RPM이다.

계산은 정상상태를 가정한 후 한 개의 노즐에 해당하는 로터 유로 영역만을 선정하여 Fig. 2와 같이 격자를 구성하고 주기조건을 사용하여 수행하였다.

유동계산에는 상용 유동해석 소프트웨어인 FLUENT™을 이용하였다. 회전하는 로터영역은 원심력과 코리올리 힘이 고려된 상대좌표계에서 계산을 수행한 뒤 절대좌표계 영역과의 경계면 처리에는 프로즌로터 기법을 적용하는 Multi Reference Frame(MRF) 방식을 사용하였다[5].

난류계산에는 RNG k-ε 모델을 사용하였고 벽면에서는 표준 벽함수를 적용하였다.

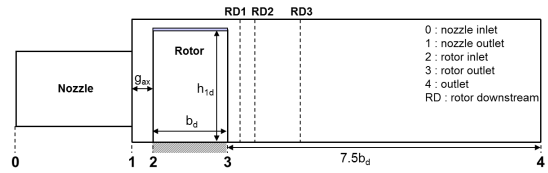


Fig. 1 Definition of turbine geometry

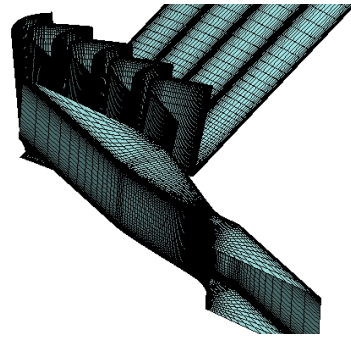


Fig. 2 Computational grid

계산에 사용된 축간극은 모두 다섯 가지 경우로 1단 로터의 블레이드 길이로 무차원화 한 g_{ax}/h_{1d} 값으로 나타내고 있으며 Table 1에 표로 정리하였다.

Table 1. Test Cases

	Axial gap(mm)	g_{ax}/h_{1d}
case 1	1.5 mm	0.0457
case 2	2.5 mm	0.0762
case 3	3.5 mm	0.1067
case 4	4.92 mm	0.15
case 5	9.8 mm	0.2987

계산결과에 쓰인 값들은 노즐출구(Fig.1의 1), 로터입구(2), 로터출구(3)와 로터 하류 쪽으로 각각 로터코드 길이의 20%(RD1), 40%(RD2), 100%(RD3)인 지점에서 필요에 따라 질량평균 혹은 면적평균 한 값들을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

계산을 통해 얻은 팁 누설 유량 결과를 노즐 입구 유량의 백분율로 환산하여 축간극에 따라 Fig. 3에 나타내었다.

일반적으로 유동이 입사되어 들어오는 노즐 영역에서 축간극을 따라 팁(tip) 방향으로 가스의 누설이 생기면 그에 의한 출력손실, 늘어난 누설유량에 의한 windage loss 및 팁누설유동과 로터를 빠져나온 유동의 vortex 상호작용 같은 손실이 부가적으로 발생하게 된다.

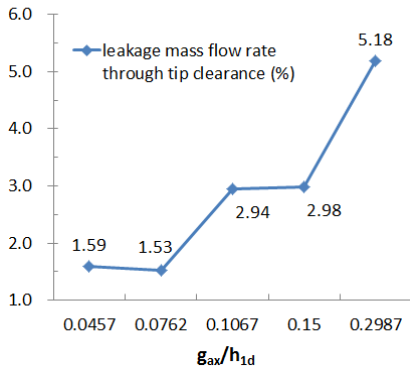


Fig. 3 Tip leakage mass flow rate

Figure 4는 로터 입구와 출구에서의 평균 유동 물성치들을 나타낸 것으로 순서대로 각각 정압 분포, 상대 마하수, 상대 유동각의 결과를 나타낸다. 먼저 정압분포를 보면 축간극이 증가하면 로터 입구의 압력이 감소한다. 축간극이 늘어날 수록 노즐 출구를 빠져나온 유동은 로터의 허브와 팁 부분까지 혼합되고 확산되면서 로터 입구 쪽으로 더 넓고 균일하게 들어가게 되는데 이로 인한 추가적인 손실들이 발생하지만 그림에서 나타나듯이 로터 입구 압력의 감소는 노즐의 팽창비를 높여주어 노즐에서의 효율을 높이고 로

터 입구의 상대 마하수를 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 하지만 앞서 살펴본 대로 축간극에 따른 누설유량의 증가는 운동량 손실로 나타나 로터 출구 마하수는 점차 줄어들고 있는 것을 알 수 있다.

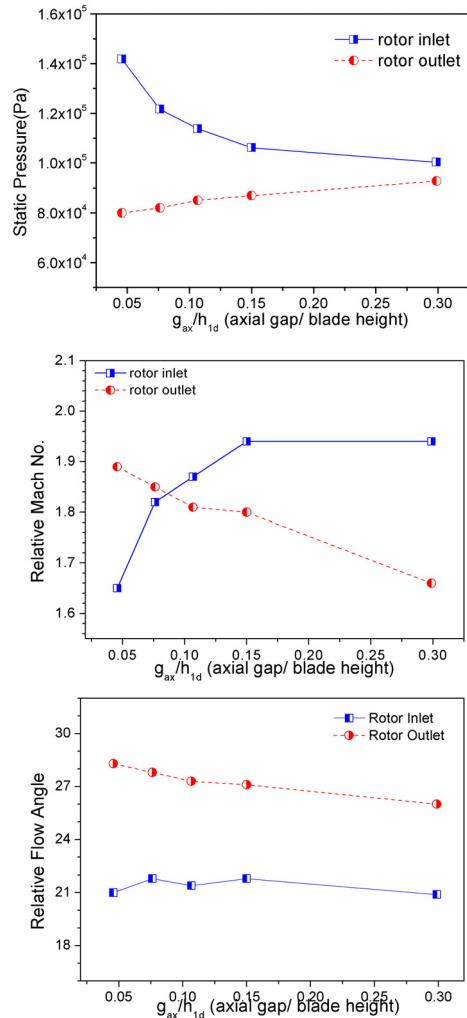


Fig. 4 Flow properties at rotor inlet & outlet: Static Pressure(Pa), Relative Mach Number, Relative Flow Angle(deg.)

다음으로 상대 유동각의 경우는 로터 입구에서는 약간씩의 변동은 있지만 큰 변화는 없으나 축간극의 증가가 로터 출구에서의 유동각을 감소시키는 것을 볼 수 있다.

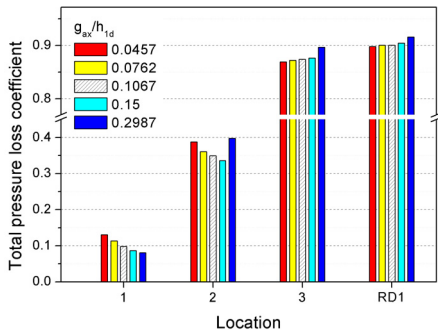


Fig. 5 Total pressure loss at several locations

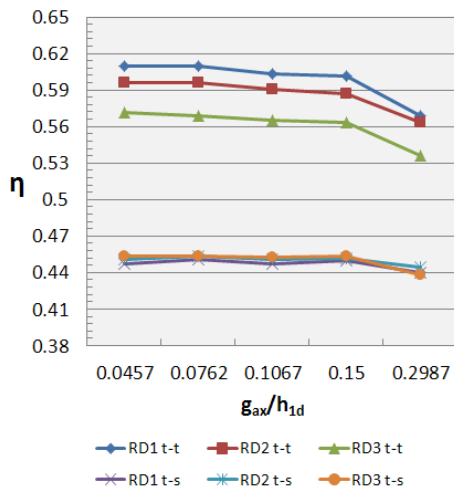


Fig. 6 Total-to-total and total-to static efficiency at downstream of the rotor outlet

축간극에 따른 전체 성능의 변화를 보기 위해 터빈 각 부분에서 전압손실계수를 측정하여 Fig. 5에 나타내었으며 Fig. 6에는 로터 후방 (RD1~RD3) 에서의 전효율(t-t)과 정효율(t-s)을 표시하였다. Figure 5를 살펴보면, 노즐출구(1번 위치)까지의 손실계수는 앞서 언급한대로 축간극이 커질수록 그 값이 작아졌다. 로터입구(2)까지, 즉 축간극 내에서의 손실은 case5(0.2987)의 경우만 제외하면 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 반면 로터 내부에서는 축간극이 커질수록 손실계수도 커져서 전체적인 손실은 Fig. 6의 정효율 그래프에서도 보듯이 case4까지는 거의 변화가 없었다. 하지만 전효율의 경우는 축간극이 커질수록 저하되는 경향을 나타내고 있다.

4. 결 론

부분 흡입형 초음속 터빈의 노즐과 1단 로터 사이의 축간극을 변화시켜가며 3차원 유동해석을 수행하고 그에 따른 터빈 내부의 유동과 터빈 성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

노즐-로터 사이의 축간극은 로터 입·출구에서의 정압을 변화시켜 노즐 효율에 영향을 주었고 축간극 내에서의 전압 손실은 일정 값 이상의 축간극 이전에서는 거의 비슷한 분포를 보임을 확인하였다. 슈라우드가 장착된 로터에서는 축간극은 틱간극과 함께 틱 누설량에 관여하는 변수임을 확인 할 수 있었고 터빈 단의 전효율은 축간극이 작을수록 향상되는 것을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2008-2006289)

참 고 문 헌

- Balje, O. E., Turbomachines: A Guide to Design, Selection, and Theory, John Wiley & Sons Inc., 1981
- 정은환, 강상훈, 신동윤, 박편구, 김진한, "터보펌프 터빈의 성능 및 노즐-로터 간극의 영향에 대한 실험적 고찰," 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp.78-86
- Grönman, A., Numerical modelling of small supersonic axial flow turbines, dissertation, Acta Univ. Finland, 2010
- Gorrell, S. E., Okiijsi, T. H., Copenhaver, W. W., "Stator-Rotor Interactions in a Transonic Compressor Part 1: Effect of Blade-Row Spacing on Performance", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 125, 2003, pp.328-335
- Fluent User's Guide, Fluent Inc., 2006