

초음속 터빈의 로터 블레이드 스윙 효과에 대한 수치적 연구

정수인*† · 정은환** · 김귀순***

A Numerical Study of Blade Sweep Effect in Supersonic Turbine Rotor

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

ABSTRACT

In this study, we performed three-dimensional CFD analysis to investigate the effect of the rotor blade sweep of a partial admission supersonic turbine on the stage performance and the flow field. The computations are conducted for three different sweep cases, No sweep(NSW), Backward sweep(BSW), and Forward sweep(FSW), using flow analysis program, FLUENT™ 6.3 Parallel. The results show that BSW model give the effect on the reducing of mass flow rates of tip leakage and the increasing of t-to-s efficiency.

초 록

본 연구에서는 액체로켓엔진의 터보펌프용 초음속 터빈 로터 블레이드에 스윙 각도 $\pm 15^\circ$ 를 적용하여 전방스윙(FSW), 후방스윙(BSW)모델의 유동형태 및 성능을 기준모델(NSW)과 비교하여 스윙 적용의 효과를 살펴보았다. 3차원 Navier-Stokes 유동해석에는 상용 코드인 FLUENT 6.3 Parallel을 사용하였다. BSW 모델은 기준 모델(NSW)에 비해 팁 간극으로 빠져나가는 누설 손실량을 줄이는데 효과가 있었고 정효율 증가에도 영향을 미쳤다.

Key Words: Supersonic Turbine(초음속터빈), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump(터보펌프), Blade Sweep(날개스윙), Turbine Performance(터빈성능)

1. 서 론

현재 사용되고 있는 많은 산업/항공기용 가스

터빈과 압축기에는 성능 향상을 위해 반경방향의 중첩선을 3차원적으로 변화를 주는 3차원 익형 설계 방법이 널리 쓰이고 있다. 3차원 익형 설계는 반경방향의 중첩선에 린(Lean), 스윙(Sweep), 스큐(Skew)를 주는 방식으로 주로 적용한다.

많은 연구자들이 아음속이나 천음속 영역의

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹

*** 부산대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: sooin@pusan.ac.kr

압축기 로터에 3차원 익형설계를 도입하여 그 효과를 연구하였는데, 특히 Hah[1] 등은 전방 스윙을 적용하면 날개 끝단의 엔트로피 생성과 이차유동의 발생을 억제하고 후방 스윙은 충격손실을 줄이는데 효과가 있다고 보고하고 있고, Vad[2]등은 저속의 축류형 유체기계에서 후방 스윙을 적용하면 효율 면에서 우수함을 보였다. 이 외에도 여러 논문에서 최적화 기법을 이용해 축류 압축기나 팬의 3차원 형상을 설계하고 성능 개선을 보고하였다[3, 4].

본 연구팀의 이전 연구에서 부분 흡입형 초음속 터빈의 로터 블레이드에 스윙과 린 등의 3차원 형상을 적용하여 유동해석을 수행하고 그 결과를 정리한 바 있다[5]. 그 중에서 특히 1단 초음속 터빈의 로터에 스윙각을 5°, 10°, 15° 적용하여 1단 전효율이 0.5%~1.8%까지 개선됨을 확인하였다.

본 연구에서는 이전의 연구 결과를 토대로, 터빈의 성능향상 면에서 가장 효과를 보였던 스윙 형상을 초음속 1단 터빈의 로터 블레이드에 적용하여, 스윙각이 유동현상과 터빈의 성능특성 변화에 미치는 영향을 구체적으로 분석하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 계산영역

본 절에서는 익단 간극 및 노즐-로터 축 간극을 모두 가지는 부분 흡입형 초음속 터빈 모델에 대해서 초음속 영역인 1단 터빈의 로터 블레이드에 스윙각을 적용하여 계산을 수행하였다.

일반적으로 스윙각은 Fig. 1에서 보이듯이 로터가 축 방향으로 기울어지는 각도로써 정의한다[6]. 노즐-로터간의 축 간극은 Fig. 1에 나타내었듯이 블레이드 Midspan에서의 노즐-로터간 간극 거리를 기준으로 정의하였다.

계산에 사용된 터빈은 2단형 속도 복합형 초음속 터빈으로 수축-확산형 노즐과 2개의 동익 그리고 1개의 정익으로 이루어져 있다. 동익에는 슈라우드가 있어 압력면에서 흡입면으로의 틈

누설손실은 없도록 하였다.

본 연구에는 초음속 영역에 해당하는 1단 로터까지만 전산해석을 실시하였고 후류영역은 전산 테스트를 거친 후 로터 블레이드 코드 길이의 5배만큼으로 설정하였다. 계산 영역은 계산비용과 효율을 고려해 1개의 노즐에 해당되는 유동영역을 설정하고 경계면에 회전주기조건을 주어 계산하게 된다. 격자수는 대략 150만개 정도가 사용되었다. Fig. 2에는 Midspan에서의 형상과 격자가 나와 있다.

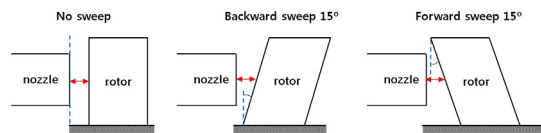


Fig. 1 Definition of Sweep Angle and axial gap (g_{ax})

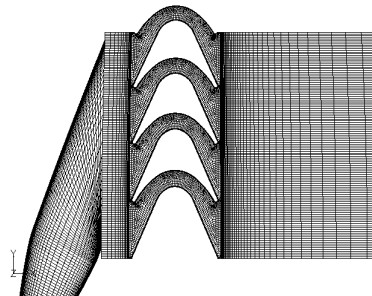


Fig. 2 Computational Grid at Midspan of Computational Domain

2.2 수치기법

전산해석에는 상용 3차원 전산유동해석 프로그램인 FLUENT 6.3 Parallel을 사용하였다. 수렴의 가속화를 위해 다중격자 기법을 적용한 외재적(Explicit) 방법으로 계산하였고 유한체적 경계면에서의 변수들은 모두 2차의 정확도를 가지는 상류차분법을, 시간 차분에는 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. 난류 처리를 위해서는 2방정식 모델인 SST k- 모델을 사용하였다.

계산에 사용된 경계조건은 터빈 입구에서 전압력 1.95MPa, 전온도 373K이고 터빈 출구에는 정압력 0.1MPa를 주었으며 1단 로터는 6147.5

RPM으로 회전하도록 하였다. 모든 벽면에는 접촉조건을 적용하였다. 노즐을 제외한 각 계산영역들은 회전주기조건을 주어 계산하게 되고 노즐 출구와 축 간극 입구의 인터페이스에서는 Non-conformal mesh기법을 사용하여 모델링하였다. 모든 회전 인터페이스에서는 Frozen rotor 방식으로 경계값을 주고받는다.

2.3 계산 케이스

계산에 사용된 터빈의 각 지점 명칭을 Fig. 3에 나타내었다. 계산은 모두 3가지의 경우에 대해 이루어졌다. 축 간극을 로터 블레이드 높이로 무차원화 한 값 g_{ax}/h_{1d} 을 0.24로 설정하고 계산을 수행하였고 기준이 되는 No Sweep(NSW)을 포함하여 Backward Sweep(BSW), Forward Sweep(FSW) 모델에 대해 계산을 하였다. 스윙 각도는 모두 15° 로 동일하였고 축간극 $g_{ax}/h_{1d} = 0.24$ 는 스윙 모델의 허브나 팁 중 가장 짧은 축간극 거리가 3.5mm가 되도록 조절 한 것이다.

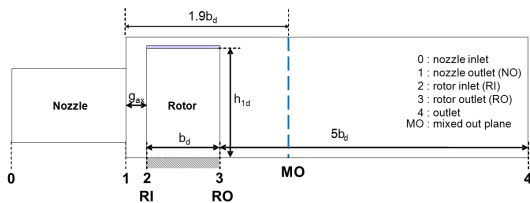


Fig. 3 Turbine geometry

3. 결과 및 고찰

Table 1에는 계산을 통해 얻어진 각 케이스 별 성능결과를 나타내었다. 표에 언급되는 NO, RI, RO면은 Fig. 3에 나와 있듯이 각각 노즐 출구, 로터 입구 그리고 로터 출구면에서의 값을 의미하고 MO면은 로터 출구와 팁 출구에서 나온 유동이 어느 정도 혼합이 되는 지점으로 본 연구에서는 모든 케이스 다 노즐 출구로부터 후류 쪽으로 날개 코드길이의 1.9배만큼 떨어져 있는 공통된 지점이다.

먼저 Fig. 4는 로터의 팁 간극을 통해 빠져나가는 질량 유량의 비를 각 계산 모델별로 막대 그래프로 비교해 나타낸 팁 누설량 그림이다.

결과를 살펴보면 팁간극을 통해 빠져나가는 누설량에 스윙이 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 스윙에 따른 팁 누설정도를 살펴보면 기준이 되는 NSW 모델에 비해 FSW 모델은 큰 변화가 없지만 BSW모델은 누설량이 큰 폭(56%)으로 줄어들었음을 알 수 있다.

Figure 5에서 터빈의 정효율(T-to-s Efficiency)을 살펴보면 로터 출구에서의 효율은 NSW 모델이 제일 높은 것으로 나왔는데 BSW모델과는 0.4% 차이가 나고 제일 낮은 효율을 보이는 FSW보다는 약 0.7% 높은 수치이다. Mixed Out(MO)면에서의 효율은 후류에 의한 손실과 마찰 손실 외에 팁 간극에서 나온 유량과 주유동의 혼합으로 인한 추가적인 손실이 더 생기기 때문에 팁누설량 그래프에서 살펴 본 누설 유량에 비례하여 효율이 떨어지는 경향을 보인다.

Table 1. Computational Results

Model	Tip Leakage (%)	Mach No. / Rel. Mach No.			Relative Flow Angle (°)		T-to-s Efficiency (%)		Specific Work (kJ/kg)
		NO	RI	RO	RI	RO	RO	MO	MO
$g_{ax}/h_{1d} = 0.24$	NSW	2.37	1.9	1.62	20.64	24.15	45.56	44.25	93.83
	FSW	2.31	1.85	1.62	17.93	24.42	44.89	42.84	91.18
	BSW	2.43	1.98	1.55	23.30	23.00	45.16	44.89	94.55

RO: Rotor Out Plane MO: Mixed Out Plane

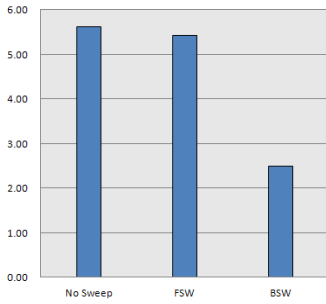


Fig. 4 Tip Leakage (%)

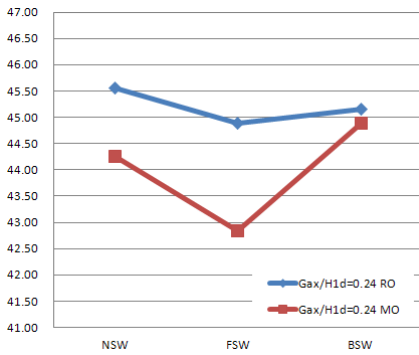


Fig. 5 T-to-s Efficiency (%)

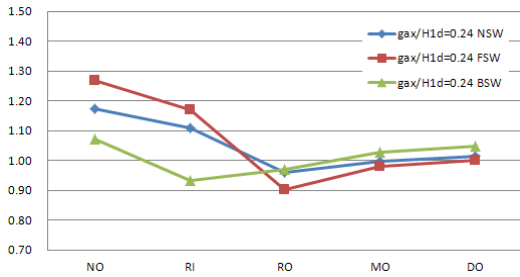
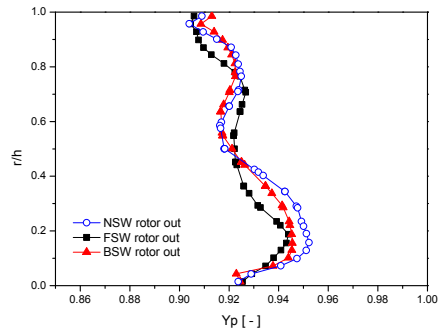


Fig. 6 Static Pressure at Each Section (p/p_0)

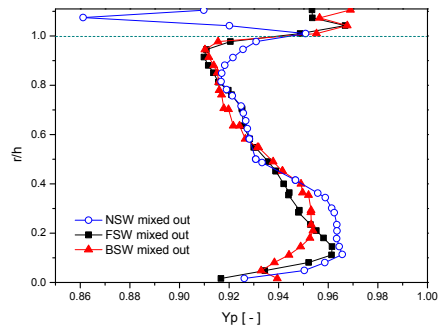
그 결과, 누설유량이 적었던 BSW모델의 효율이 NSW모델보다 0.65% 가량 높게 나오고 있다.

다음으로, Fig. 6에는 터빈 여러 위치에서의 유량평균 된 정압력을 설계배압으로 무차원화하여 나타내었다. 그래프를 보면 노즐 출구에서는 각 모델간의 정압력이 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. NSW 모델에 비해 BSW 모델은 노즐에서 유동이 더 팽창하고 그 결과로

Table 1에서 보듯이 노즐 출구와 로터 입구에서의 마하수가 제일 크다. 이에 반해 FSW모델의 경우는 기준모델과 비교해 노즐에서 팽창을 덜하는 것으로 나타났다. 동익 유로 내에서의 압력도 BSW모델이 비교적 균등하게 나오는 데 비해 NSW와 FSW모델은 유로 내에서 팽창을 해서 동익 입출구 압력변화가 꽤 있음을 알 수 있다.



(a) Loss coeff., $g_{ax}/h_{1d} = 0.24$, RO



(b) Loss coeff., $g_{ax}/h_{1d} = 0.24$, MO

Fig. 7 Loss coefficient Y_p along the spanwise direction

Figure 7의 (a)와(b)는 전압손실계수 Y_p 를 피치방향으로 평균하여 로터 출구 (RO), Mixed Out (MO)면에서 블레이드 스패 길이 방향으로 나타낸 그림이다. 여기서 전압손실계수는 한 지점에서의 전압 차이를 터빈 출구에서의 동압으로 무차원화 한 값으로 다음과 같이 정의한다.

$$Y_p = (p_{01} - p_0) / (p_{01} - p_3) \quad (1)$$

로터 출구 면에서의 손실계수 값은 프로파일 손실과 흡입면 박리, 그리고 2차유동손실의 영향이 포함 되어 있다.

그림에서 알 수 있듯이, 이 값은 계산 모델마다 스팬의 특정 부분에서 서로 다른 양상을 보이고 있는데 Fig. 7의 (a)를 살펴보면 로터 출구 면에서는 대략 허브에서 스팬의 50%까지는 NSW모델에 비해 FSW와 BSW모델이 손실계수 값이 적게 나오고 팁 쪽(75% 이상)은 FSW 모델의 손실계수 값이 적게 나타났다. 나머지 부분에서는 NSW와 BSW 모델이 비슷했다.

Figure 7(b)를 보면 MO면에서는 허브 쪽 20%까지는 BSW모델이 성능이 좋은 것을 알 수 있고 Midspan은 서로 비슷하게 가다가 팁 쪽에 가까워지면 NSW모델보다는 FSW와 BSW모델의 손실이 적음을 확인할 수 있다. 이 사실은 로터 출구(RO) 면에서의 반경방향 속도성분으로도 알 수 있는데, 확인 결과 허브와 팁 쪽의 2차 유동(Secondary Flow)의 크기가 BSW와 FSW모델에서 부분적으로 NSW모델에 비해 작아진 것을 알 수 있었고 이는 Fig. 7의 결과와 일치하는 경향을 보였다.

4. 결 론

부분 흡입형 초음속 터빈의 1단 로터 블레이드에 스윙 각도를 적용하여 전방스윙(FSW)과 후방스윙(BSW) 모델의 유동형태 및 성능을 기준 모델(NSW)과 비교하여 스윙 효과가 유동과 터빈 성능에 미치는 영향을 살펴 보았다.

후방스윙(BSW)의 경우 기준모델에 비해 팁 간극으로 빠져나가는 누설 손실량을 줄이는데 효과가 있었고 0.65% 가량의 정효율 증가를 가져왔다. 반면 FSW모델은 BSW모델에 비해 팁누설

손실량이나 효율면에서는 크게 개선되는 현상이 보이지 않았다. 그러나 부분적인 유동을 살펴보면 터빈유로 내의 허브와 팁 쪽에서 FSW모델과 BSW모델이 NSW모델에 비해 2차 유동을 줄여 주어 높은 성능을 보이는 구간이 존재하였다.

참 고 문 헌

1. Hah, C, Puterbaugh, S.L., and Wadia, A.R., 1999, "Control of shock structure and secondary flow field inside transonic compressor rotor through adrodynamic sweep." ASME 99-GT-561, 1999
2. Vad, J., Kwedikha, A.R.A., and Jaberg, H., 2004, " Influence of Blade Sweep on the Energetic Behavior of Axial Flow Turbomachinery Rotors at Design Flow Rate." ASME Turbo Expo, GT-2004-53544, 2004
3. 서성진, 최승만, 김광용, "스윙과 린을 적용한 축류송풍기 날개의 최적설계," 대한기계학회 학술대회 강연집, 2005, pp.2637-2642
4. 안찬술, 김광용, "반응면 기법을 이용한 축류 압축기의 3차원 형상 최적설계," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2001, pp.135-142
5. 권태운, 정수인, 조종재, 김기순, 정은환, "스윙과 린을 적용한 부분흡입형 초음속 터빈의 성능 특성에 관한 수치적 연구," 한국추진공학회지, 제15권 2호, 2011, pp.36-43
6. Denton, J.D., and Xu, L., "The effect of lean and sweep on transonic fan performance," ASME Turbo Expo, GT-2002-30327, 2002