

스weep 각이 적용된 부분 흡입형 초음속 축류 터빈의 정상, 비정상 공력 특성에 관한 수치적 연구

정수인* · 김귀순**

Numerical Study on Steady and Unsteady Flow Characteristics of Nozzle-Rotor Flow in a Partial Admission Supersonic Axial Turbine with Sweep Angle

Soojin Jeong* · Kuisoon Kim**

ABSTRACT

Steady and unsteady three-dimensional RANS simulations have been performed on partial admission supersonic axial turbine having backward/forward sweep angles($\pm 15^\circ$) and the results are compared with each other. The objective of this paper is to study the effect of unsteadiness on turbine flow characteristics and performances. The all results indicated that the losses of unsteady simulations were greater than those of steady cases. It was also shown that BSW model give the effect on the reducing of mass flow rates of tip leakage. In unsteady simulation, the increase of t-to-s efficiency at Rotor Out plane was observed more clearly.

초 록

본 논문에서는 부분 흡입형 초음속 터빈의 로터 블레이드에 $\pm 15^\circ$ 의 스weep 각도를 적용하여 그에 의한 효과와 공력 특성을 살펴보기 위해 정상상태 유동해석과 비정상상태 유동해석을 동시에 수행하고 그 결과를 비교해 보았다. 3차원 Navier-Stokes 유동해석에는 상용 코드인 FLUENT 6.3 Parallel을 사용하였다. 모든 계산 케이스들에서 정상상태 유동해석에 비해 비정상상태의 경우가 손실이 더욱 크게 나오는 결과를 나타내었다. 후방스weep(BSW)모델은 기준모델(NSW)에 비해 팁 간극으로 빠져나가는 누설 손실량을 줄이는데 큰 효과가 있었고 비정상상태 유동 해석에서는 로터 출구면 정효율의 증가 현상이 더욱 뚜렷하게 나타났다.

Key Words: Supersonic Turbine(초음속터빈), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Unsteady Flow(비정상유동), Blade Sweep(날개스weep), Turbine Performance(터빈성능)

* 부산대학교 부품소재산업협력연구원

** 부산대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: sooin@pusan.ac.kr

터빈이나 압축기와 같은 터보기계는 성능과 효율을 매우 중요하게 생각하여 설계 시 성능 향상을 위해 효율을 높이려는 꾸준한 노력이 진행되어 왔다.

그 중에서도 아음속, 천음속 압축기와 터빈에 널리 적용되고 있는 반경방향 중첩선의 3차원 설계를 초음속 터빈에 적용 해 본 선행연구[1][2] 들에서는 3차원 익형설계 중 후방스윙(backward sweep)의 효율 향상 가능성을 보였고[1], 후방스윙과 전방스윙(forward sweep)의 유동특징을 살펴보았다[2].

한편 터보기계 내부는 정익과 동익의 상대적인 운동으로 말미암아 본질적으로 비정상 유동이다. 이런 터빈 내부의 비정상 상호작용은 단 효율이나 블레이드 부하 및 열전달 성능 등 터보기계의 성능에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다[3].

더구나 복잡한 내부 형상과 충격파, 이차유동과 같은 특성들 때문에 정확한 실험과 수치계산에도 많은 어려움이 따르고 있다.

이런 비정상 특성은 주로 익렬 간의 상호작용에 의해 발생하는데, 상류 익렬에서 발생하는 후류(wake)가 하류의 블레이드 앞전에 부딪히면서 생기는 후류 상호작용(wake interaction), 정익과 동익의 상대운동으로 인해 생기는 압력의 교란인 포텐셜 상호작용(potential interaction), 상류에서 발생한 충격파가 하류로 전파되면서 블레이드 옆을 때림으로써 발생하는 충격파 상호작용(shock interaction) 등이 있다. Figure 1은 비정상 상호작용의 종류들을 도식화하여 나타낸 그림이다[4].

그러나, 비정상 해석 시 발생하는 과도한 계산 비용 때문에 일반적으로 터빈의 정익-동익 상호작용을 고려하지 않는 정상상태 해석을 사용하는데, 혼합면(Mixing plane) 기법의 경우는 아예 상류경계면 유동장의 특성인 충격파나 후류가 하류 경계면으로 전달되지 못하고 프로즌 로터(Frozen rotor) 방식의 계산은 정익과 동익의 상대적인 위치에 따라 많게는 1% 까지도 효율이 다르게 나타나는 단점이 있다.

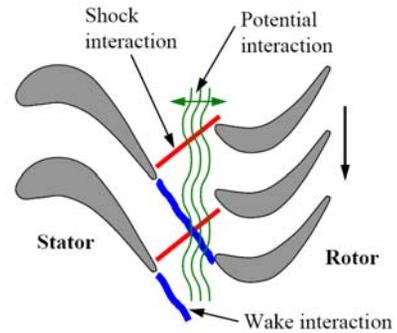


Fig. 1 Unsteady interactions[4]

최근 들어 컴퓨터의 비약적인 발전과 더불어 정상상태 해석을 주로 하던 과거와 달리 터빈 내의 비정상 상태해석이 활발히 시도되고 있다 [5][6].

본 논문은 부분 흡입형 초음속 터빈의 로터 블레이드에 $\pm 15^\circ$ 의 스윙 각도를 적용하여 그에 의한 효과와 공력특성을 살펴보기 위해 정상상태 유동해석과 비정상상태 유동해석을 동시에 수행하고 그 결과를 비교해 보았다.

2. 본 론

2.1 터빈 기본 제원 및 계산모델

계산에 사용된 터빈은 액체 로켓의 터보펌프용 터빈에 사용되는 2단형 부분 흡입형 초음속 축류터빈의 1단에 해당하는 모델로써 21개의 수축-확산형 노즐과 100개의 동익으로 구성된다. 동익은 누설손실을 방지하기 위한 슈라우드 형태로 설계되었다.

본 논문에서는 계산 시간과 비용을 고려해 주기성이 확보되는 최소한의 계산영역을 적용하여 Fig. 2와 같이 노즐 하나에 동익 4개로 구성된 유동 영역을 설정하고 경계면에 회전주기조건을 주는 방식으로 1/25 annulus 모델을 계산에 사용하였다.

초음속 영역에 해당하는 1단 노즐-로터 영역까지만 전산해석을 실시하였고 후류는 전산 테스트를 거친 후 축 방향으로 로터 블레이드 코드

길이의 5배만큼 설정하였다.

격자수는 대략 185만개 정도가 사용되었고 Fig. 2에 표면격자와 Midspan의 형상 및 내부 격자모양이 나와 있다.

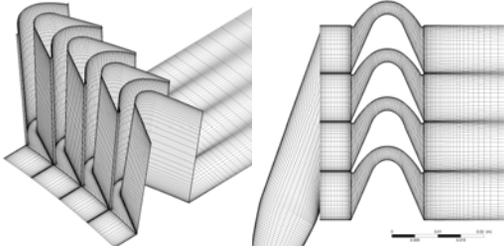


Fig. 2 Surface grid and grid at midspan

2.2 스윙형상

로터 블레이드에 적용된 스윙 각의 정의는 Fig. 3에 나와 있듯이 일반적으로 로터가 축 방향으로 기울어지는 각도로써 정의한다.

노즐-로터 사이의 축 간극 g_{ax} 는 Fig. 3에 나와 있듯이 블레이드 Midspan에서의 노즐-로터 사이 축 간극 거리를 기준으로 정의하였다.

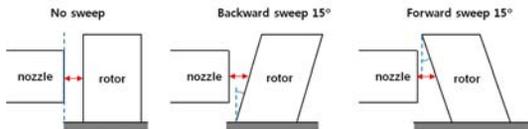


Fig. 3 Definition of Sweep Angle and axial gap (g_{ax})

2.3 수치기법

전산해석에는 상용 3차원 전산유동해석 프로그램인 FLUENT 6.3 Parallel을 사용하였다. 유한체적 경계면에서의 변수들은 모두 2차의 정확도를 가지는 상류차분법을 적용하였고, 내재적 (Implicit) 방법으로 계산하였다. 난류 처리를 위해서는 2방정식 모델인 SST k- ω 모델을 사용하였다.

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

RPM으로 회전하도록 하였다. 모든 벽면에는 점착조건을 적용하였다. 노즐을 제외한 각 계산영역들은 회전주기조건을 주어 계산하게 되고 노즐 출구와 축 간극 입구의 인터페이스에서는 Non-conformal mesh기법을 사용하여 모델링하였다.

2.3.1 정상상태 해석

정지 - 회전 영역 인터페이스인 축 간극과 로터, 로터와 후류 사이는 정상상태 해석 모델인 프로즌 로터(Frozen rotor) 기법을 적용해서 경계 값을 주고 받는다.

프로즌 로터 기법은 동익의 위치를 고정하고 동익 부분의 지배방정식에 원심력과 코리올리 효과를 고려하여 계산을 하는 방식이다.

정상상태 계산은 잔차(residual)가 1.0E-4까지 떨어지고 3만번 정도 반복계산을 한 후 수렴했다고 판단하였다.

2.3.2 비정상상태 해석

프로즌로터 모델이나 믹싱플레인 모델을 쓰면 정상상태로 가정하고 적용하는 모델들이기 때문에 앞서 살펴본 비정상 상호작용들을 무시하게 된다. 그러나 슬라이딩 메쉬 모델(SMM)은 정익과 동익의 상대적인 움직임을 계산해 넣기 때문에 비정상성을 고려할 수 있다.

비정상상태 계산의 초기 값으로는 정상상태 수렴해를 사용하여 계산시간을 줄였고 동익 유로 하나를 총 50등분으로 나누어 매 시간간격마다 1/50 간격으로 이동하면서 반복계산을 하도록 하였다. 수렴여부는 출구의 모니터링 값들이 주기적으로 일정하게 변할 때 수렴하였다고 판단했다.

2.4 계산 케이스

계산에 사용된 터빈의 각 지점 명칭을 Fig. 4에 나타내었다.

계산은 모두 6가지의 경우에 대해 이루어졌다. 축 간극을 로터 블레이드 높이로 무차원화 한 값, g_{ax}/h_{1d} 을 0.207로 설정하고 계산을 수행하였

고 기준이 되는 No Sweep(NSW)을 포함하여 Backward Sweep(BSW), Forward Sweep(FSW) 모델에 대해 각각 정상상태 해석 및 비정상상태 해석을 실시하였다. 스위프 각도는 모두 15°로 통일하였고 축간극 $g_{ax}/h_{1d}=0.207$ 은 스위프 모델의 허브나 팁 중 가장 짧은 축 간극 거리가 2.4mm 가 되도록 조절 한 것이다.

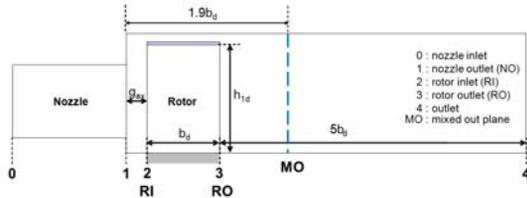


Fig. 4 Turbine geometry

3. 결과 및 고찰

Figure 5는 스위프 모델에 따라 로터의 팁 간극으로 빠져나가는 질량 유량의 비를 정상상태 유동과 비정상상태 유동 결과를 비교해 나타낸 그래프이다. 선행 연구 결과[2]와 마찬가지로 BSW 모델의 팁 누설 유량이 스위프가 없는 NSW 모델보다도 적은 것을 볼 수 있다.

정상상태해석과 비정상상태해석을 비교해 보면 비정상상태 해석일 경우 팁 누설 유량이 더 많다. 이 결과는 다음에서 언급할 효율 성능에도 영향을 미치는 한 요인이 된다.

로터 출구면(RO)과 Mixed out(MO)면에서의 터빈 정효율(t-to-s Efficiency)을 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 스위프 모델 별로 살펴보면 기준이 되는 NSW모델과 비교해 BSW모델의 정효율이 전반적으로 높게 나타나고 있고 로터출구면(RO)에서의 비정상유동 결과는 BSW, FSW 두 모델 모두 NSW에 비해 정효율이 상승했음을 볼 수 있다. 특히 BSW 모델은 1.2% 이상 상승하였다.

Figure 5의 결과와 마찬가지로 정효율 역시 비정상상태일 때가 정상상태 보다 1~1.5%정도 낮게 계산이 되었다. 팁 누설유량이 비정상유동일 때 더 커지는 것도 효율저하의 한 원인이라고

볼 수 있고 서론에서 언급한 정익-동익 상호작용과 같은 비정상 효과도 영향을 주게 된다. 비정상유동의 경우, 노즐 끝에서 발생하는 후류로 인한 손실이 전체 블레이드에 영향을 주게 되고 이 후류는 주기적으로 블레이드 통로를 따라 흐름 방향으로 전파되는데 정상해석에서는 이러한 비정상 효과를 고려하지 못하였기 때문에 전체 효율을 높게 예측하는 것으로 판단된다.

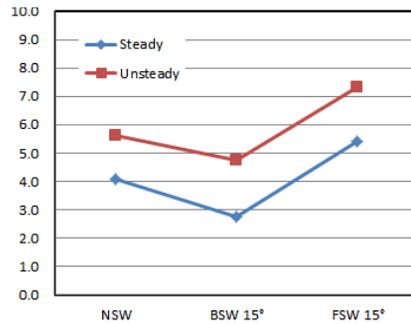


Fig. 5 Tip leakage (%)



Fig. 6 T-to-s efficiency (%)

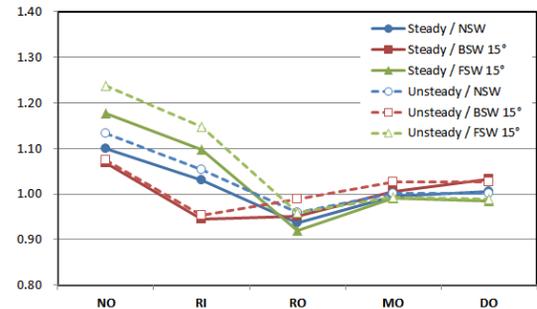


Fig. 7 Static pressure at each section (p/p_h)

터빈의 각 위치에서 질량 평균된 정압력을 설계배압(p_b)으로 무차원화 한 값을 Fig. 7에 나타내었다. 노즐출구(NO)에서의 값을 살펴보면 NSW보다 FSW모델은 노즐 내에서 유동이 덜 팽창하고 BSW모델은 더 팽창하고 있다.

노즐출구(NO)를 나온 유동은 축간극 영역에서 다시 팽창을 하고 로터입구(RI)로 들어가게 되는데 BSW모델이 제일 팽창을 많이 해서 동익 유로 내에서의 압력이 비교적 균등하게 나오고, 나머지 NSW와 FSW모델은 동익 유로 내에서 다시 팽창함을 확인 할 수 있다.

각 단면에서의 시간평균(Time-averaged)으로 구한 비정상유동의 압력 값을 보면 전체적으로 정상유동의 값보다 큰 결과를 보인다. NSW모델과 FSW모델은 노즐출구(NO)부터 로터출구(RO)까지 유동이 정상유동보다 덜 팽창하고 있다.

다음으로 시간에 따른 비정상 유동해석의 결과를 살펴보았다.

Figure 8은 스윙 모델 별로 로터입구(RI)면으로 들어가는 질량유량을 동익 유로를 4번 지나가는 4주기시간(4τ)동안 관찰한 그래프이다. 그림에서 로터 입구로 들어가는 유량의 주기성을 잘 확인 할 수 있다. 한 주기(τ) 동안에도 노즐과 동익의 상대 위치에 따라 질량유량이 영향을 받아 달라지는 것을 볼 수 있고, Fig. 5에서도 살펴보았듯이 BSW모델의 결과가 NSW모델보다 로터입구로 들어가는 질량유량이 많았다.

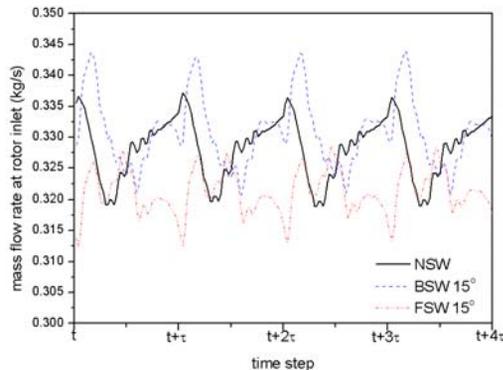


Fig. 8 Periodicity of mass flow rate at rotor inlet

로터출구(RO)와 Mixed out(MO)면에서의 정효율의 시간에 따른 변화를 Fig. 9와 Fig. 10에서 각각 살펴보았다. 두 그림 모두 시간에 따른 주기성을 역시 확인할 수 있다. Figure 9에서 볼 수 있듯이 로터출구(RO)에서의 정효율은 NSW모델의 결과보다 FSW와 BSW의 결과가 더 높게 나온다. 그러나 로터 출구를 지나 팁 누설 유량이 주 유동과 혼합이 되면서 손실이 발생하는 지점인 Mixed out(MO)면에서는 팁 누설 유량의 정도에 영향을 받아 FSW모델의 정효율이 가장 낮게 관찰되고 있다.

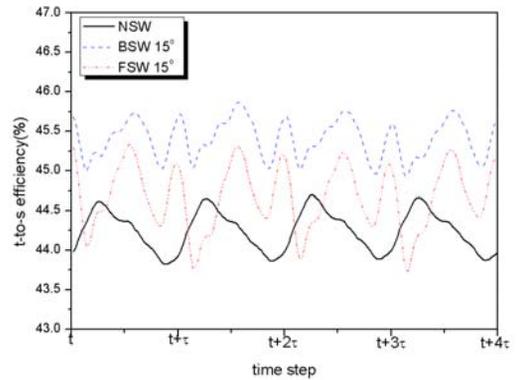


Fig. 9 Time variation of unsteady t-to-s efficiency at rotor out plane (RO)

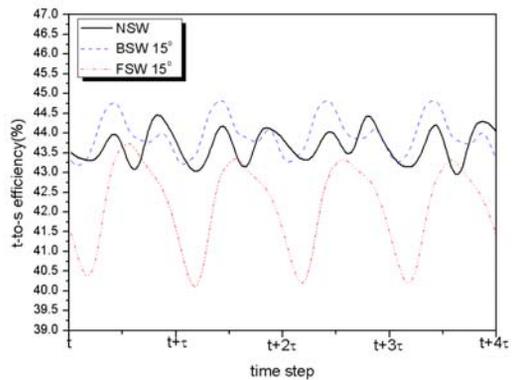


Fig.10 Time variation of unsteady t-to-s efficiency at mixed out plane (MO)

Figure 11과 Fig. 12에서는 시간 평균된 정효율의 값을 피치방향으로 평균하여 각각 로터출구(RO)와 Mixed out(MO)면에서 블레이드 스펬 길

이 방향으로 나타낸 그림이다.

허브, 미드스팬 그리고 팁 부분 각각 성능이 좋게 나타나는 스윙 모델이 다르지만 두 그래프 모두에서 허브에서 스패의 30%까지는 BSW 모델의 성능이 확연히 좋은 것을 알 수 있다.

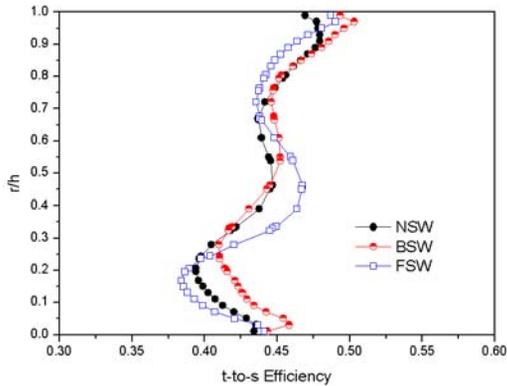


Fig.11 Time-averaged t-to-s efficiency distribution at rotor out plane (RO)

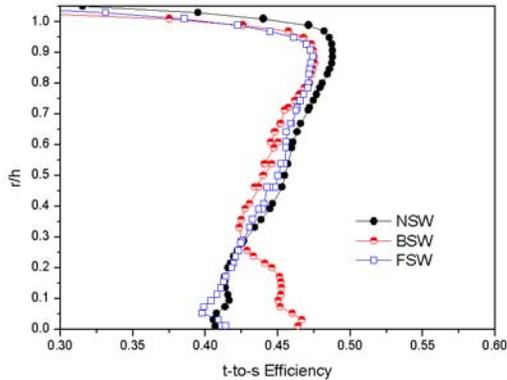


Fig.12 Time-averaged t-to-s efficiency distribution at mixed out plane (MO)

4. 결 론

부분 흡입형 초음속 터빈의 1단 로터 블레이드에 스윙 각도를 적용하고 1/25 annular에 해당하는 노즐 및 동익열에 대해 정상 및 비정상 유동해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다.

비정상 효과로 인해 정상유동 해석결과에 비해 전체적으로 팁 누설유량 증가와 정효율 감소가 있었다. 스윙각을 적용한 비정상유동 계산 수행 결과, 정상유동 계산 결과[2]와 마찬가지로 후방스윙(BSW)모델은 NSW 모델에 비해 팁 간극으로 빠져나가는 누설 손실량을 줄이는데 효과가 있었고 1.2% 가량의 정효율 증가도 보였다.

비정상 유동 특성의 분석 결과 정익-동익 상호작용에 의한 주기성을 관찰 하였고 후방스윙(BSW)모델의 허브에서 스패의 30% 까지 성능이 우수함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 “학연협력강화사업 성과창출형 과제 : KARI-University Partnership Program” Development of System Integration Program for Liquid Rocket Engine(2009-09-성과-2)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 권태운, 정수인, 조종재, 김귀순, 정은환, “스윙과 린을 적용한 부분흡입형 초음속 터빈의 성능 특성에 관한 수치적 연구,” 한국추진공학회지, 제15권, 제2호, 2011, pp.36-43
2. 정수인, 정은환, 김귀순, “ 초음속 터빈의 로터 블레이드 스윙 효과에 대한 수치적 연구,” 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회 논문집, pp.830-834
3. Dring, R. P., Joslyn, H. D., Hardin, L. W. and Wagner, J. H., “Turbine Rotor-Stator Interaction,” J. of Engineering for Power, Vol. 104, pp.729~742, 1982
4. FLUENT Inc., “FLUENT 6.3 User’s Guide”, 2006
5. Rashid, S., Tremmel, M., Waggott, J. and Moll, R., “Curtis Stage Nozzle/Rotor Aerodynamic Interaction and the Effect on Stage Performance,” J. of Turbomachinery,

vol.129, July, 2007, pp.551-562

6. Shyam, V., Ameri, A., Luk, D. F. and Chen, J. P., "Three-Dimensional Unsteady Simulation of a Modern High Pressure Turbine Stage Using

Phase Lag Periodicity : Analysis of Flow and Heat Transfer," NASA/TM-2010-216064