

## 2단형 초음속 터빈의 유동에 대한 전산해석

조종재\* · 서종철\* · 김상조\* · 김귀순\*\* · 정은환\*\*\*

### Numerical Analysis for Flow in Two-Stage Supersonic Turbines

Jongjae Cho\* · Jongchul Seo\* · Sangjo Kim\* · Kuisoon Kim\*\* · Eunhwan Jeong\*\*\*

#### ABSTRACT

Numerical Analysis of two-stage supersonic turbines were conducted, and the results were analyzed. FLUENT™ commercial flow analysis package was employed for the calculation of the turbine. Characteristics of the turbine performance were investigated according to the overlap height and existence of the shroud at the second rotor blade through the calculations.

#### 초 록

본 연구에서는 2단형 초음속 터빈의 유동에 대한 전산해석을 수행하고 그 결과를 비교 분석하였다. 2단 전체에 대한 계산을 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT™ 사용하였다. 2단 동익에 대한 계산을 통하여 2단 동익의 중첩높이의 변화에 따른 터빈의 성능변화를 고찰하였다. 또한 2단 동익에서 슈라우드의 유·무에 따른 터빈의 성능변화를 고찰하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Two-Stage Supersonic Turbine(2단형 초음속 터빈), Numerical Analysis(전산해석)

#### 1. 서 론

우주 발사체의 필수 구성요소인 추진제 공급 시스템은 액체로켓의 엔진에 연료와 산화제를 공급하는 기능을 하는 것으로 가압탱크 방식과 터보펌프 방식이 있다. 가압탱크 방식을 이용한 엔진은 그 단순성으로 인해 로켓의 상단엔진으

로 사용하는 사례가 많으나 고압 연소를 통한 성능의 극대화 측면에서는 한계가 있다[1]. 따라서 엔진 성능의 극대화를 위한 엔진의 고압화를 위해서는 터보펌프의 사용이 필수적이다.

터보펌프는 가스 발생기에서 생성된 고온 고압의 가스를 이용하여 구동되는 터빈을 구동원으로 펌프를 작동시켜 액체로켓의 엔진에 연료와 산화제를 공급하는 장치이다. 이러한 터보펌프를 구동하는 터빈은 낮은 효율에도 불구하고 소형, 경량 이면서 높은 출력을 낼 수 있는 초음속 터빈이 주로 사용된다. 터보펌프 구동용으로 사용되는 초

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

\*\*\* 한국항공우주연구원 터보펌프 그룹

연락처, E-mail: spacecho@pusan.ac.kr

음속 터빈의 경우, 1개의 로터를 가지면서 구조가 간단하고 가벼운 장점을 가지는 반면 가스발생기에서 생성된 에너지를 효율적으로 이용하지 못하는 단점이 있는 단단형과 단단형에 비해 높은 비추력을 갖지만 복잡한 구조와 상대적으로 높은 설계 난이도를 갖는 다단형이 있다.

본 연구에서는 보다 높은 비추력을 갖는 터보펌프 구동용 2단형 초음속 터빈을 개발하기 위해 설계된 2단형 터빈에 대해 2단 동익의 중첩높이(Overlap height)의 변화와 슈라우드(Shroud) 유·무에 따른 유동해석을 수행하고 터빈 성능특성 변화를 분석하였다.

## 2. 계산 조건

### 2.1 터빈제원

본 연구에 적용된 2단형 터빈은 Fig. 1과 같이 2개의 동익과 1개의 정익 그리고 총 21개의 수축·확산형 노즐로 구성되어 있다. 설계된 터빈의 입·출구 압력비는 19.5, 입구온도는 373 K이며 6147.5 RPM에서 운전되도록 설계되었다.

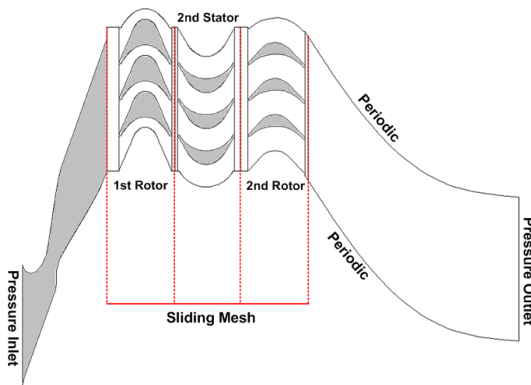


Fig. 1 Computational Domain of the Turbine Stage

### 2.2 계산조건

본 계산에서는 터빈 유동을 정상상태로 가정한 후, 1개의 노즐에 해당하는 영역에 대해 주기조건(Periodic condition)을 적용하여 계산을 실시하였으며, 회전부와 정지부의 계계면에서는 슬라이딩 메쉬(Sliding mesh)기법[2]을 적용하여 계산을 수행하였다.

계산에서는 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 위해 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하였으며, 계산은 모두 3차의 공간정확도를 갖는 MUSCL기법[3]을 적용하였다. 그리고 난류 처리를 위해 재순환유동 및 박리유동의 예측성능이 뛰어난 것으로 보고되고 있는 2방정식 모델인 RNG k-ε모델[4]을 사용하였으며, 벽면에서는 비평형벽함수(None-Equilibrium Wall Function)기법을 사용하였다.

### 2.2 계산격자

계산 영역인 노즐 하나에 대해 구성된 격자는 Fig. 2와 같다. 1단 동익에 약 67만개, 2단 동익에 약 44만개의 격자가 사용되었으며, 총 계산 영역에서 약 178만개의 격자가 사용되었다.

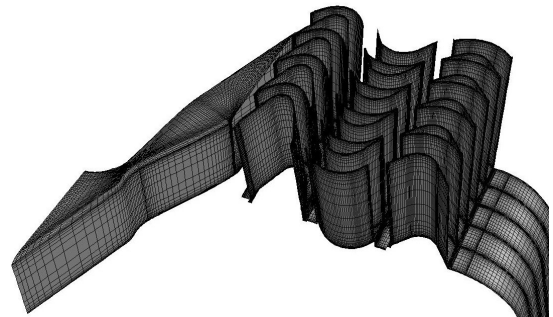


Fig. 2 3D View of the Computational Grid

## 3. 계산 결과

### 3.1 중첩높이에 따른 터빈 성능변화

각 터빈 단에서의 중첩높이는 제작상의 오류 및 각 터빈 단을 빠져나오는 유동의 다음 단 사이의 간극(Gap)에서 확산, 충분한 유로 확보 등의 경우를 위해 필요하다. 본 연구에서는 2단 정익을 빠져나오는 유동이 2단 동익 사이의 간극에서 확산되므로 이에 따른 2단 동익에서의 중첩높이가 필요하므로 전산해석으로 통해 중첩높이의 변화가 터빈성능에 미치는 영향을 분석하였다.

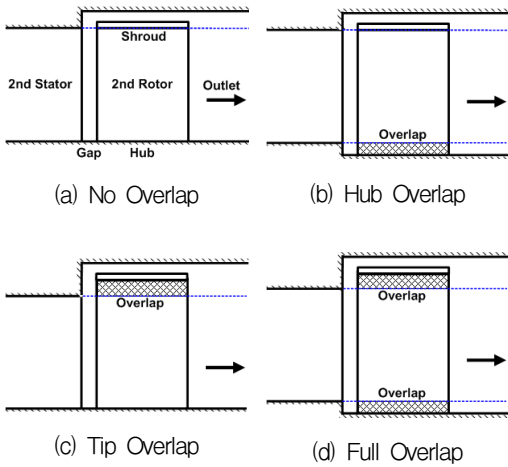


Fig. 3 Schematic Views of Overlap Position

먼저, 중첩높이의 설정 위치가 터빈성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인해보았다. 비교 대상은 Fig. 3과 같이 중첩높이가 없는 경우, 2단 동익 익근(Hub), 2단 동익 익단(Tip), 2단 동익 익근과 익단에 설정한 경우들이다. 각 경우에서 설정한 중첩높이는 2단 정익 높이의 3.3%에 해당하는 크기이다.

Figure 4는 전산해석을 통해 얻어진 각 중첩높이 위치에 따른 Pathline이다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이 2단 정익을 통과한 유동이 2단 동익과 2단 정익 사이의 간극에서 확산되는 것을 알 수 있으며, 이러한 유동의 확산으로 로터팁 간극사이로 유동이 빠져나가면서 유동손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 2단 동익의 경우, 원주방향으로 큰 접선속도를 가질 뿐만 아니라 1단 동익에 비해 축방향 속도가 작으므로 팁간극으로의 누설유동이 더 많이 발생할 것으로 예상된다. 중첩높이가 없는 Fig. 4(a)의 경우, 그 현상을 확실히 관찰할 수 있으며, 2단 정익과 동익 사이의 간극에서 확산된 유동이 2단 동익 팁 간극 사이로 누설되는 것을 확인할 수 있다. Figure 4(b)의 2단 동익 익근에 중첩높이를 준 경우로 중첩높이가 없는 경우와 별다른 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. Figure 4(c)는 2단 동익 익단에 중첩높이를 준 경우이다. 앞의 두 경우에 비해 2단 동익 팁사

이의 간극으로 빠져나가는 누설유동이 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. Figure 4(d)는 2단 동익의 익근과 익단에 중첩높이를 준 경우로 익단에 중첩높이를 준 Fig. 4(c)에 비해 팁간극 사이로 좀더 적은 양의 누설유동이 발생하는 것을 볼 수 있다.

Table 1은 각 중첩높이 위치에 따른 2단 동익 팁간극 사이의 누설유동량을 나타낸 것이다. 중첩높이가 없는 경우는 2단 동익으로 들어오는 전체 질량유량의 5.06%가 2단 동익 팁간극 사이로 누설되며, 이 누설유동은 터빈의 동력을 발생시키는데 사용되지 못하므로 손실과 직결된다. 2단 동익 익근에만 중첩높이를 준 경우는 전체 질량유량의 4.92%가 누설되며, 익단에만 중첩높이를 준 경우에는 전체 질량유량의 2.33%가 누설된다. 익근에 중첩높이를 준 경우보다 익단에 중첩높이를 준 경우가 더 많은 누설유동이 감소되는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 익근에 중첩높이를 주는 경우보다 익단에 중첩높이를 주는 경우가 팁간극 사이로의 누설유동을 막는데 더 효과적인 것을 확인할 수 있다.

Table 2는 각 중첩높이 위치에 따른 2단 동익에서의 비출력(Specific work)과 전체 터빈에서의 정효율(Total to static efficiency)을 나타낸 것이다. 표의 비출력은 2단 동익 익단과 익근에 중첩높이를 준 경우(Full overlap)의 비출력을 각 경우의 비출력으로 나누어 무차원화하였으며, 정효율 역시 같은 방법으로 무차원화하였다. 표에서 알 수 있듯이 중첩높이의 적용으로 줄어든 팁간극 사이의 누설유동으로 터빈의 동력을 발생시키는데 더 많은 유동이 익렬 유로로 유입됨에 따라 2단 동익에서 발생하는 동력이 증가한 것을 확인할 수 있다. 중첩높이가 없는 경우에 비해 익단과 익근에 중첩높이를 준 경우, 비출력 약 4% 정도 상승하였다. 하지만 익근에 중첩높이를 준 경우는 비출력 상승이 약 0.3% 정도에 그쳐, 그 효과가 크지 않음을 알 수 있다. 전체 터빈의 정효율 관점에서 중첩높이를 적용함으로써 효율이 상승하는 것을 표를 통해 확인할 수 있다. 그러나 전체 터빈에서 2단이 발생하는 출력이 약 22~23% 지나지 않으므로 전체 터빈 효율 관점에서의 효율 상승은 그렇게 크지 않다.

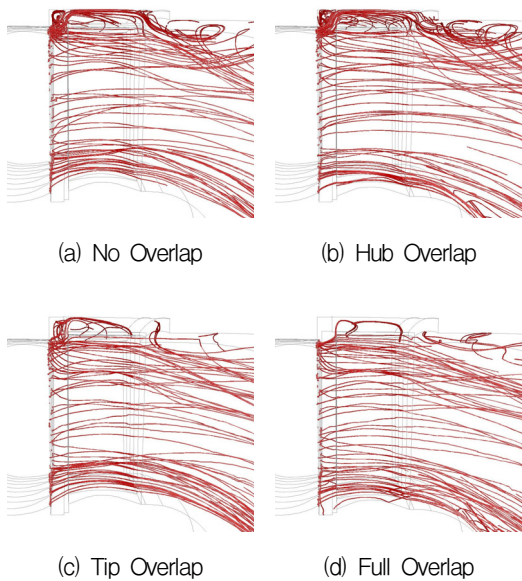


Fig. 4 Pathlines According to Overlap Positions (Left Side : 2nd Stator Outlet)

Table 1. Mass Flow Rate According to Overlap Positions

Overlap Position	Mass Flow Ratio (%)
No Overlap	5.06
Hub Overlap	4.92
Tip Overlap	2.33
Full Overlap	2.22

Table 2. Efficiency According to Overlap Positions

Overlap Position	Specific Work	Efficiency
No Overlap	0.9599	0.9884
Hub Overlap	0.9636	0.9921
Tip Overlap	0.9976	0.9953
Full Overlap	1.0000	1.0000

### 3.2 슈라우드 존재에 따른 터빈 성능변화

압력면과 흡입면의 압력차로 동력을 발생시키는 터빈은 로터의 익단에서 이로 인한 누설 유동이 발생하며, 터빈의 성능을 저하시키는 원인 중에 하나가 된다. 따라서 이를 방지하기 위한 목적으로 슈라우드를 사용한다. 하지만 슈라우드를 적용한 터빈 로터는 제작의 난이도가 높고

제작시간이 많이 걸리며, 특히 날개의 익근면에 높은 응력이 유발되어 구조적 안정성을 저하시킨다[5]. 본 연구에서는 2단 동익에서 슈라우드의 존재에 따라 터빈의 성능이 어떻게 변화하는지 그 영향을 분석해보았다.

Figure 5는 2단 동익의 익단과 익근에 중첩높이를 적용한 상태에서 슈라우드 존재에 따라 전산해석한 결과를 Pathline으로 나타낸 것이다. Figure 5(a)에서 확인할 수 있듯이, 슈라우드가 있는 경우는 압력면과 흡입면의 압력차에 의한 누설 유동이 발생하는 않는다. 하지만, 슈라우드가 없는 Fig. 5(b)의 경우는 틱간극 사이로 누설 유동이 발생하는 것을 볼 수 있다.

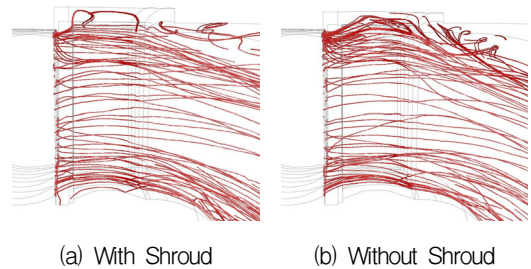


Fig. 5 Pathlines According to Overlap Positions with Full Overlap (Left Side : 2nd Stator Outlet)

Table 3은 2단 동익의 슈라우드 존재에 따른 2단 동익 틱간극 사이로 누설되는 질량유량을 나타낸 것이다. 슈라우드가 적용된 경우는 틱간극 사이로 전체 질량유량의 2.22%가 빠져나가는 것을 알 수 있다. 슈라우드가 적용되지 않은 경우는 틱간극 입구부분에서 전체 질량유량의 0.62%, 중간 부분에서 4.44%, 출구부분에서 6.32%가 빠져가며, 이는 2단 동익에 적용된 중첩높이의 영향으로 2단 동익 유로에서 순차적으로 빠져나감에 따른 것이다.

Table 4는 2단 동익의 슈라우드 존재에 따른 2단 동익에서의 비출력(Specific work)과 전체 터빈에서의 정효율(Total to static efficiency)을 나타낸 것이며, 비출력은 슈라우드를 적용한 경우의 비출력을 적용하지 않은 경우의 비출력으로 나누어 무차원화하였으며, 정효율 역시 같은

방법으로 무차원화하였다. 슈라우드가 적용되지 않는 경우, 틱간극 사이로 누설유동이 발생함에 따라 손실이 발생하며 이 손실로 인해 비추력이 슈라우드를 적용한 경우에 비해 약 7.5% 정도 감소하였으며, 전체 터빈에서의 효율 또한 감소하였다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 전체 터빈에서 2단이 발생하는 출력이 약 22~23%에 지나지 않으므로 효율의 감소 정도는 크지 않다. 또한, 누설 유동이 로터 유로에서 순차적으로 빠져나가게 되므로 틱 유동 중의 일부는 동력 발생에 기여하게 되어 누설 유량의 크기에 비해 터빈성능에 미치는 영향은 작아지게 된다.

출력이 약 22~23%에 지나지 않으므로 전체 터빈 효율 관점에서의 효율 상승은 그렇게 크지 않은 것으로 파악되었다.

2단 동익에 슈라우드가 적용되지 않는 경우는 슈라우드를 적용한 경우에 비해 비추력이 약 7.5% 정도 감소하였으며, 전체 터빈에서의 효율 또한 감소하나, 전체 터빈의 효율 감소 정도는 크지 않다. 누설 유동이 로터 유로에서 순차적으로 빠져나감에 따라 틱 유동 중의 일부가 동력 발생에 기여하게 되어 누설 유량의 크기에 비해 터빈성능에 미치는 영향은 작은 것을 확인하였다.

Table 3. Mass Flow Rate According to Existence of Shroud

Existence of Shroud	Mass Flow Ratio (%)	
With Shroud	2.22	
Without Shroud	In.	0.62
	Mid.	4.44
	Out.	6.32

## 후 기

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

Table 4. Efficiency According to Existence of Shroud

Existence of Shroud	Specific Work	Efficiency
With Shroud	1.0000	1.0000
Without Shroud	0.9245	0.9893

## 참 고 문 헌

## 4. 결 론

본 연구에서는 2단형 초음속 터빈에 대해 2단 동익의 중첩높이(Overlap height)의 변화와 슈라우드(Shroud) 존재에 따른 유동해석을 수행하고 터빈 성능특성 변화를 분석하였다.

계산결과 2단 동익에 중첩높이가 없는 경우에 비해 익단과 익근에 중첩높이를 준 경우, 비출력 약 4% 정도 상승하였으나, 익근에 중첩높이를 준 경우는 비출력 상승이 약 0.3% 정도에 그쳐, 그 효과가 크지 않음을 확인하였다. 전체 터빈의 정 효율 관점에서도 중첩높이를 적용함으로써 효율이 상승하였으나, 전체 터빈에서 2단이 발생하는

1. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황", 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회, 2005, pp.375~383.
2. Fluent User's Guide, Fluent, Inc., 2006.
3. Van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov's Method," Journal of Computational Physics, Vol. 32, 1979, pp.101 - 136.
4. Yakhot V. and Orszag S. A., "Renormalization Group Analysis of Turbulence. 1. Basic Theory," Journal of Science Computation, Vol. 1, 1986, pp.3-51.
5. Kalmykovi C. P., "Calculation of Gas dynamic and Geometric Parameters of Turbine," HYSA-99-S0001, 1999.