

2단형 터보펌프 터빈의 유동해석

박편구*, 정은환**, 김진한***

Numerical Analysis of Two-Stage Turbopump Turbines

Pyun-Goo Park*, Eun-Hwan Jeong**, Jinhan Kim***

Abstract

Numerical analyses of two-stage turbopump turbines were conducted. One of the candidates for the 1st rotor was selected based on the result of the numerical investigation. Besides, the effects of the stator height on the turbine performance were studied. Finally, the performance of the entire two-stage turbine was predicted by numerical calculation. The result showed that the two-stage turbine produces more specific power than a one-stage turbine.

초 록

1차원 설계에서 설계된 2단형 터보펌프 터빈에 대한 유동해석을 수행하고 결과를 비교 분석하였다. 1단 동익에 대한 계산결과로부터 가장 우수한 1단 익형을 선정 한 후 정익의 입·출구 높이 변화에 따른 터빈의 성능변화를 고찰하였다. 2단 전체에 대한 계산을 수행하고 같은 출력의 단단형 터빈에 비해 높은 비출력을 갖는 터빈의 설계가 가능함을 확인하였다.

키워드 : Turbopump(터보펌프), Two-Stage Supersonic Turbine (2단형 초음속 터빈), CFD (전산유체), 비출력(Specific Power)

1. 서 론

항공우주연구원에서는 소형위성발사체에 적용할 터보펌프의 개발을 수행하고 있으며 이를 위하여 터보펌프용 터빈 개발을 진행하고 있다. 터보펌프는 액체로켓엔진에 연료와 산화제를 공급하는 장치로 고온·고압의 가스로 작동되는 터빈을 사용하여 산화제와 연료펌프를 구동하는 구조를 갖고 있다. 현재까지 개발된 터보펌프는 1개

의 로터를 갖는 단단형으로 설계되어 있다.

이러한 터빈은 구조가 간단하고 가벼운 장점을 갖는 반면 가스발생기에서 생성된 가스를 효율적으로 이용하지 못하는 단점을 갖는다. 단단형 터빈은 보다 높은 비추력을 갖지만 복잡한 구조와 상대적으로 높은 설계난이도를 갖는 단점이 있다. 본 연구에서는 보다 높은 비추력을 갖는 터빈 개발을 위하여 설계된 2단형 터빈에 대한 유동해석을 수행하고 결과를 분석 하였다.

접수일(2007년12월14일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

* 터보펌프팀/pyun9@kari.re.kr

** 터보펌프팀/jeh@kari.re.kr

*** 터보펌프팀/jhkiim@kari.re.kr

2. 터빈 제원

2.1 터빈 설계

2단형 터빈은 2개의 동익과 1개의 정익 그리고 11개의 축대칭 수축-확산형 노즐로 구성되어 있으며 동익은 슈라우드형으로 설계하여 팁에서의 누설손실이 없도록 하였다. 1단과 2단 동익의 연결부에는 커빅 커플링(Curvic coupling)을 적용하여 동력의 전달과 함께 축의 정렬이 동시에 이루어지도록 하였다. 설계된 터빈의 형상을 단단형 터빈과 함께 아래에 도시하였다.

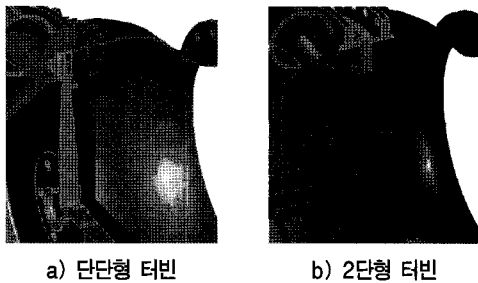


그림 1. 터빈의 비교

설계된 터빈의 입·출구 압력비는 18, 입구 온도는 1000K 이며 11,000RPM에서 운전되도록 설계되었다.

동익의 압력면과 흡입면은 볼텍스 유동이론을 적용하여 구현하였으며 천이구간의 형상설계에는 MOC기법을 적용하였다. 정익은 유동 굴절을 극대화할 수 있는 축방향 플레어(flare) 형상의 유로를 갖도록 입출구의 날개높이를 선정하였다.

3. 해석조건

3.1 계산조건

실제 터빈의 형상은 회전축에 대하여 축대칭이 아니며 내부에는 비정상성이 강한 유동이 존재하므로 이에 대한 해석을 수행하기 위해서는 많은 계산 자원과 시간이 소요된다. 이러한 어려

움을 극복하기 위해 본 계산에서는 1개의 노즐에 해당하는 영역에 대하여 주기조건을 적용한 계산영역을 구성하고 터빈의 유동을 정상상태로 가정한 후 회전부와 정지부의 경계면에서는 프로즌 로터(Frozen Rotor)기법을 적용하여 계산을 수행하였다.

계산은 상용 유동해석 소프트웨어인 FINE™/Turbo를 이용하여 수행하였으며 공간 차분에는 중앙 차분법을, 시간 차분에는 4단계 Runge-Kutta법을 적용하였고 수렴의 가속화를 위해 3단계의 다중격자법을 적용하였다. 또한 난류계산을 위하여 표준 k-ε 모델을 사용하였으며 벽면에서는 벽함수를 적용하였다.

3.2 계산 격자

1개의 노즐에 대하여 구성된 격자를 아래 그림에 나타내었다.

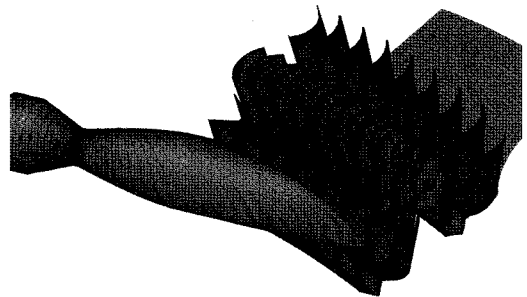


그림 2. 계산 격자

1단 동익에 약 162만개, 2단 동익에 95만개의 격자가 사용되었으며 2단 전체 계산의 경우 약 389만개 격자가 사용되었다.

4. 계산 결과

4.1 1단 동익의 해석 결과

1단 동익은 전체 출력의 약 75%를 발생시키도록 설계되었으므로 2단 터빈의 설계에서 가장 중요한 요소이다.

A형을 기본으로 3개의 단면을 설계하고 유동 해석을 수행하였다. 각 단면은 같은 입출구 유동 각과 날개 높이를 가지며 코드 길이와 날개의 두께, 그리고 흡입면의 형상에서 차이를 보인다. B형은 A형에 비해 날개 두께와 코드 길이가 커졌으며 C형은 압력면의 곡률이 커졌다. 아래 그림에 각단면의 형상을 비교하여 나타내었다.

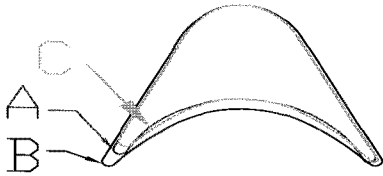


그림 3. 1단 동익의 단면 비교

계산을 통해 얻어진 각 동익의 성능을 아래 표에 나타내었다.

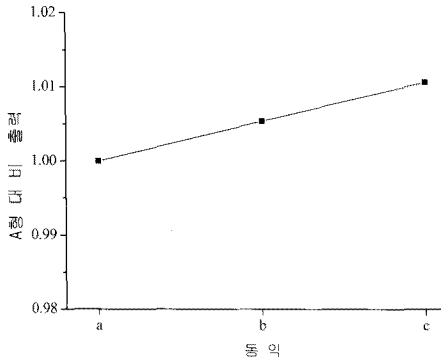


그림 4. 1단 동익의 성능 비교

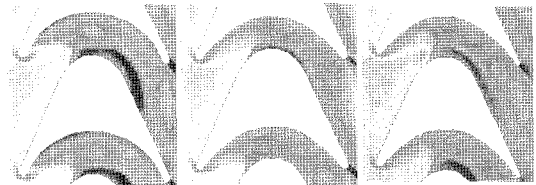
계산 결과 A형에 비해 B형은 0.6%, C형은 1.1%의 출력향상을 보이고 있다.

표 1 로터 전후방에서의 상대 마하수

	A형	B형	C형
입구	1.983	1.968	2.008
출구	1.703	1.784	1.732

성능 차이를 고찰하기 위하여 위의 표와 다음 그림에 로터 전후방에서의 상대 마하수 평균값과 중앙단면에서의 절대 마하수 분포를 나타내었

다. 먼저 A형 단면의 경우 흡입면의 후방부에서 큰 2차 유동이 보이는 반면 B형 단면의 경우 흡입면에서 이러한 2차유동이 사라지면서 성능향상을 보이게 된다. 하지만 입구 마하수가 A형과 C형에 비해 작으며 C형의 경우 입구 마하수는 크지만 로터 후방에서의 2차 유동으로 인해 후방 마하수는 B형에 비해 작게 예측되고 있다.



a) A형 b)B형 c)C형

그림 5. 중앙단면에서의 절대 마하 수

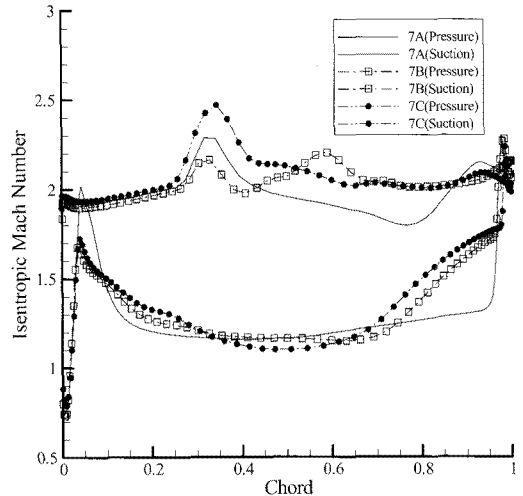


그림 6. 날개면에서의 등 엔트로피 마하 수

위 그림에 나타난 등 엔트로피 마하수 결과를 살펴보면 B형의 경우 후방부에서는 C형보다 우수하지만 흡입면의 전방부에서 낮은 등엔트로피 마하수를 보인다. 이것은 두꺼워진 날개 두께로 인하여 노즐 출구의 유동이 유로 내로 잘 유입되지 못해 입구 마하수가 작기 때문이라고 생각된다. A형 동익의 경우 압력면에서의 작은 곡률로 인하여 압력면의 앞부분에서 등 엔트로피 마하수

가 높아져 터빈 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있으며 압력면의 곡률이 커진 C형의 경우 이러한 점이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 압력면의 형상 변화는 흡입면의 중·후반부에도 영향을 미치는데 C형의 경우 흡입면에서의 유동이 A형에 비해 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 결국 가장 우수한 성능을 보인 C형 동익은 입구에서의 높은 마하 수와 흡입면에서 개선된 유동으로 인해 가장 높은 출력을 얻을 수 있었다.

4.2 정익 변화에 따른 성능 변화

정익은 1단 동익을 통과한 유동의 방향을 바꾸어 2단 동익으로 보내는 역할을 한다. 본 연구에서 설계된 터빈의 정익은 유동의 회전을 크게 하기 위하여 입구보다 출구의 크기가 큰 형태로 설계하였는데 전산해석을 통하여 이러한 정익의 입·출구 크기 변화가 터빈성능에 미치는 영향을 분석하였다. 동익은 앞에서 가장 성능이 우수한 C형을 사용하였다. C~E2형까지의 정익은 모두 같은 단면 형상을 갖고 있다.

표 2 정익 변화에 따른 성능변화

정익	출력	전방 높이	후방 높이
C	1.000	1.064	1.166
E1	0.998	1.053	1.208
E2	1.000	1.053	1.251
G	0.964	1.053	1.166

위 표에 1단 동익의 높이로 무차원화된 정익의 입출구 높이와 C형 출력으로 무차원화된 터빈의 출력을 도시하였으며 각 계산에서 얻어진 유동각을 그림7에 나타내었다.

같은 단면을 사용하는 정익의 경우 정익의 입출구 높이의 변화는 터빈성능에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 정익 출구의 유동각에도 크게 변화를 주지 못하고 있다. 다만 단면 형상이 변화된 G형의 경우 터빈 성능과 유동각이 변화하는 것을 관찰할 수 있는데 특히 정익의 변화가 앞단 동익의 출구 유동각을 변화시켜

터빈의 출력을 감소시키는 결과를 가져오고 있다. C~E2 계산의 경우 정익의 전방 높이가 비슷한 값을 갖기 때문에 터빈 성능이 유사한 것으로 판단되며 본 계산에 적용된 터빈의 경우 정익 출구의 면적변화가 유동각에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

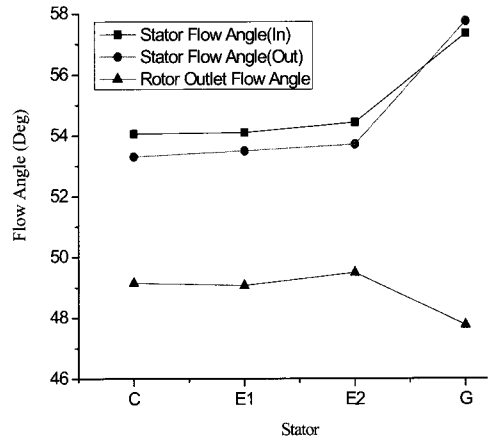


그림 7. 정익 변화에 따른 유동각

4.3 2단 터빈의 해석결과

전체 2단 터빈의 형상에 대한 유동해석을 수행하였다. 계산은 C형 동익과 정익을 사용하였으며 목표 출력 대비 97%의 출력을 얻을 수 있었다. 위 결과를 동등 출력으로 설계된 1단형 터빈과 비교하면 아래 표와 같다.

표 3 1단형 터빈과의 비교

	출력	유량	효율
1단형	1.0	1.0	1.0
2단형	0.97	0.786	1.094

1단 동익의 출력은 전체 출력의 약 77.5%로 설계값과 유사한 값을 도출하고 있다. 따라서 2단의 성능을 개선하거나 약 4%의 터빈 유량을 증가시킨다면 1단형과 동등한 출력을 발생시키는 터빈을 설계 할 수 있다. 유량이 증가되더라도 1단형 대비 약 82%만의 유량을 소모하므로 1단형

에 비해 우수한 비출력을 가질 것으로 예상된다. 정익과 동익의 입출구에서의 평균값을 살펴보면 노즐 출구의 초음속 유동은 정익을 빠져 나올 때 까지 초음속 상태를 유지하며 2단 동익에서 아음속으로 바뀌게 된다. 2단 동익 입구에서는 동익과 정익의 상대 위치에 따라 초음속인 유로가 존재하며 이로 인해 유로 안에 충격파가 발생하는 모습이 아래 결과에서 관찰된다.

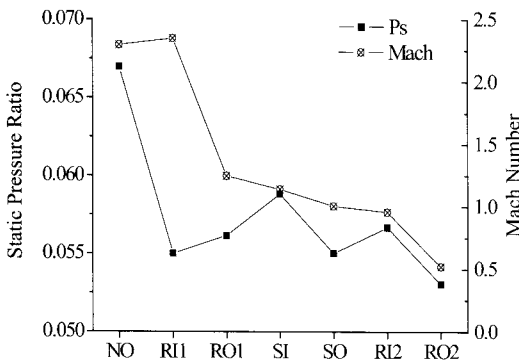


그림 8. 평균 물성값의 변화

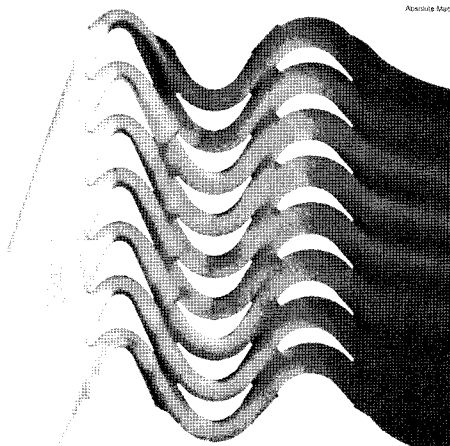


그림 9. 절대 마하 수

아래 그림은 1단 동익과 2단 동익 사이의 전압력의 변화를 나타낸 결과로 1단 동익과 정익 사이에서의 전압 손실이 정익과 2단 동익 사이에서 보다 크게 나타나고 있다. 이것은 1단 정익과 동익 사이에서는 유동의 높은 마하수와 불균일성

으로 손실이 커지기 때문이다.

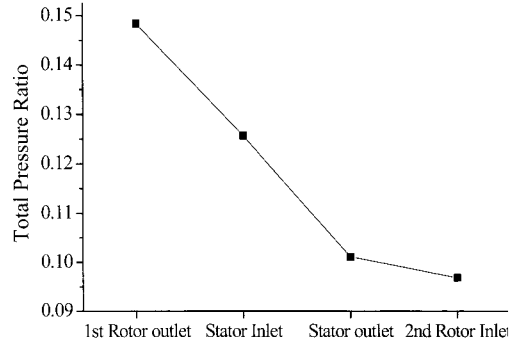


그림 10. 전압력의 변화

그림11의 단면도에서 보는 바와 같이 뒷단에 위치하는 날개의 높이가 앞단에 위치하는 날개보다 길고 팁에는 슈라우드를 장착하여 누설 손실을 방지하도록 설계되어 있다.

그림 8의 정압 변화를 살펴보면 동익의 입출구에서 압력차가 존재하므로 팁에서의 축방향 유동이 존재할 것으로 예측된다. 그러나 각 동익의 팁으로 빠져나가는 유량을 구해보면 단면을 지나가는 유량의 0.2% 정도에 불과하여 설계된 2단 터빈의 경우 팁에서의 누설 손실이 매우 작음을 알 수 있다.



그림 11. 터빈의 단면 계략도

표 4 동익의 유로와 팁에서의 유량

	1단	2단
유로	99.85%	99.83%
팁	0.15%	0.17%

한편 2단 동익의 팁 전단에서의 유동을 살펴보면 축방향의 속도는 매우 작으나 원주방향으로 큰 접선속도를 가지며 나선 운동을 하는 복잡한

양상을 보인다. 따라서 이에 의한 손실이 예상되지만 2단 동익의 유동에 영향을 주는 부분이 팁의 일부로 제한되므로 손실의 크기는 크지 않을 것으로 예상된다.

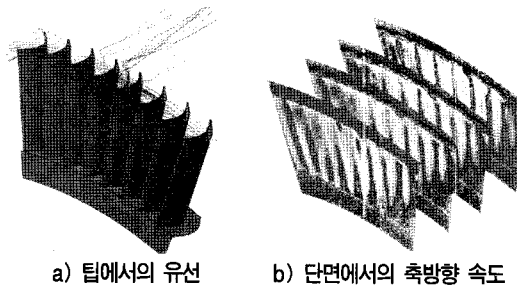


그림 12. 2단 동익의 팁단 유동

5. 결 론

터보펌프용 터빈으로 설계된 2단형 터빈에 대한 유동해석을 수행하고 결과를 고찰하였다. 1단 동익에 대한 계산을 통해 압력면의 형상과 날개 두께에 따른 성능변화를 확인하고 1단 동익의 단면을 선정하였다. 정익의 입출구 높이를 변화시킨 형상에 대한 계산을 수행하여 유동각의 변화를 관찰하였으며 본 연구에 적용된 터빈의 경우 이러한 정익의 변화가 유동각에 미치는 영향이 적음을 확인하였다. 전체 2단 형상에 대한 계산을 수행하고 4%의 터빈 유량을 증가 시킨다면 1단형과 동등한 출력을 발생시키면서 높은 비출력을 갖는 2단형 터빈의 설계가 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 김진한, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, 2005, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, 2005, pp. 375~383
2. Galpin, P.F., Broberg, R.B., and Hutchinson, B.R., "Three Dimensional Navier-Stokes

Predictions of Steady State Rotor/Stator Interaction With Pitch Change," The Third Annual Conference of the CFD Society of Canada, Bnaff, Canada, 1996

3. FINETM/Turbo User Manual Version 6.1-a, pp.5-3~5-22
4. B. V. Ovsyanikov & B. I. Borovsky, "Theory and calculation of power units for liquid rocket engine," Mashinostroyenie. Moscow. 1986.
5. 조광래 등, 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업(VI), 대전, 한국항공우주연구원, 2008, 제3권, pp. 1517~1524