

터보펌프의 속도복식 터빈에 대한 성능 연구

이항기* · 정은환* · 박편구* · 김진한*

Experimental Study of the Velocity Compound Turbine in Turbopump

Hanggi Lee* · Eunhwan Jung* · Pyungu Park* · Jinhan Kim*

ABSTRACT

The performance experiment was tested for the velocity compound turbine of turbopump which was the main part of 75 ton class liquid rocket engine. The seal is installed between the 1st rotor and the reversing vane to reduce the leakage flow. The turbine outlet pressure of the velocity compound turbine by changing the rotating speed was compared with that of baseline turbine with single rotor including the effect on the total performance.

초 록

75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프에 장착되는 속도복식 터빈에 대한 성능 시험을 수행하였다. 1열 로터와 리버싱 베인 사이에 누설 유량을 줄이는 씬을 설치하여 씬 간극이 성능에 미치는 영향을 실험하였다. 그리고 속도복식 터빈과 단단으로 구성된 기본형 터빈을 비교하여 회전수에 따른 후방 압력 변화와 함께 성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Supersonic Impulse Turbine(초음속 충동형 터빈), Velocity Compound Turbine(속도 복식 터빈), Seal(씬), Outlet Pressure(후방 압력)

1. 서 론

한국항공우주연구원(이하 항우연)에서 한국형 발사체 개발 사업을 진행하고 있다. 한국형 발사체는 개방형 액체로켓엔진을 채택하고 있으며 터보펌프는 개방형 액체로켓엔진의 핵심 구성품으로 액체산소와 케로신을 고압으로 연소실에

공급하는 심장과 같은 역할을 수행한다. 터보펌프는 발화점이 극히 낮은 극저온의 액체산소와 고온의 터빈 구동 가스가 공존하며 높은 회전수로 작동하므로 개발에 난제가 많다. 실제 해외 사례에서도 발사체 실패의 많은 원인이 터보펌프에서 발생한다는 점도 터보펌프 개발의 난이도를 가늠할 수 있다. 항우연에서는 그동안 30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프의 개발을 실패할 환경 하에서 성공적으로 수행하였으며 이를 토대로 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프를 개발

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail: hglee@kari.re.kr

중이다[1-2]. 이와 동시에 상단용 5-10톤급 액체 로켓엔진용 터보펌프도 함께 개발 중이다.

개발 중인 기본형 터빈은 안정적 작동을 해야 하는 발사체 부품 특성상 단순해야 하기에 단단으로 구성된 충동형 방식의 터빈을 채택하였다. 또한 단위 유량당 출력을 높이기 위하여 큰 팽창비를 갖도록 설계하며 상대적으로 적은 유량에서 운전이 되는 수축-확산 노즐을 갖는 부분 분사형의 초음속 충동형 방식을 채택하였다.

또한 항우연에서는 단단으로 구성된 기본형 터빈 외에 예비 방안으로 효율을 더 증가시킬 수 있으며 무게를 줄일 수 있는 2개의 로터로 구성된 속도복식 터빈을 개발하였다[3].

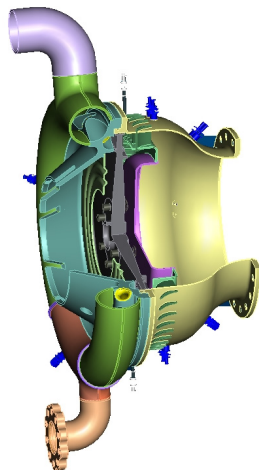
본 연구에서는 참고 논문[3]에서 개발한 속도복식 터빈을 기초로 1열 로터와 리버싱 베인 사이에 셸을 설치하여 간극에 대한 효과를 시험하였다. 그리고 속도복식 터빈(Velocity compound turbine)은 기존 단단으로 구성된 기본형 터빈(Baseline turbine)과는 달리 출구 유도 정익(EGV) 없이 로터의 회전 속도에 따라 유동의 출구 방향이 정해지기에 회전수에 따른 작동점의 변화와 성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 속도 복식 터빈 및 시험 장치

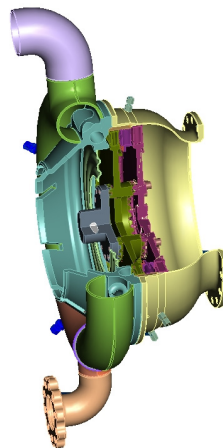
2.1 속도 복식 터빈

Figure 1는 항우연에서 개발 중인 기본형 터빈과 속도복식 터빈의 형상이다. 기본형 터빈은 노즐과 로터, 그리고 로터 지난 후 원주 방향 속도를 없애주는 출구 유도 정익(EGV)으로 구성되어 있다. 반면 속도복식 터빈은 노즐과 2개의 로터, 그리고 로터 사이에 유동 방향을 바꾸어 주는 리버싱 베인으로 구성되어 있다. 속도 복식 터빈은 기본형 터빈과 동일하게 모든 팽창은 노즐에서 일어나며 로터를 지나면서 정압력의 변화 없이 속도 변화만 생긴다.

기본형 터빈은 노즐에서 분사된 초음속 유동의 에너지를 1단의 로터에서 모두 흡수를 하지 못하고 전체 에너지의 1/3정도를 후방으로 버리게 된다. 버려지는 에너지는 곧 손실로 연결이 되며, 터빈 후방에 연결되는 배관등 여러 계통 설계에 영향을 미치게 되어 마진을 증가로 인해 불필요한 무게등이 증가하게 된다. 반면 속도복식 터빈은 2열로 구성된 로터에서 유동이 가진 에너지를 순차적으로 최대한의 에너지를 흡수하게 된다. 때문에 더 높은 효율을 기대할 수 있다. 그리고 속도비를 더 낮추어 로터 직경을 줄여 무게 감소를 꾀하여도 여전히 기본형 터빈에 비해 높은 효율을 기대할 수 있다. 그러므로 효



(a) Baseline turbine



(b) Velocity compound turbine

Fig. 1 Turbine ISO drawing

을 향상과 무게 감소라는 장점이 있기에 부품수의 증가라는 단점에도 속도 복식 터빈은 실제 해외 터보펌프 터빈에 많이 적용이 되어 왔다.

2.2 시험 조건 및 시험 설비 구성

Table 1은 기본형과 속도복식 터빈의 설계점 및 원래 시험 상사점을 나타내었다. Fig. 2는 원내에서 기본형과 속도복식 터빈의 시험 모습이다.

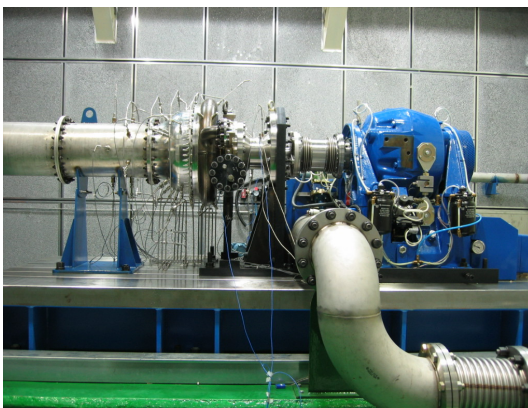
항우연 내에는 고압 공기 설비가 갖추어져 있어서 터빈 성능 시험은 고압공기 공급 설비를 이용한 상사시험으로 이루어졌다. 상사 시험설비

는 Fig. 3에서 각 0.9m³의 320bar의 고압 용기가 44개가 병렬로 이루어져 있으며 고압 용기에서 나온 공기는 압력 조절 밸브를 거쳐 정해진 압력으로 감압된다. 감압된 공기는 병렬로 구성된 1차 유량계를 지나 공기가 합쳐지는 믹서 및 2차 유량계를 거쳐 터빈으로 공급된다.

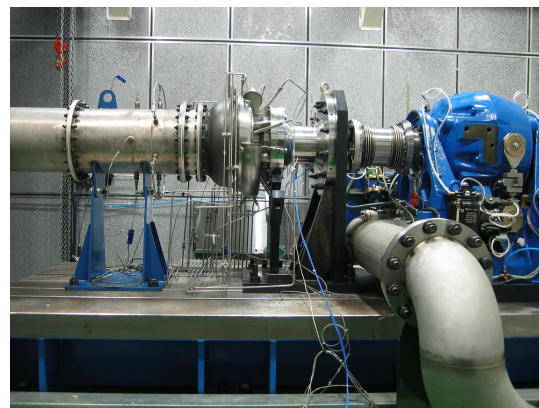
터빈 상사 시험에는 터빈에서 생성된 동력을 흡수 및 제어를 위해 Froude hoffman사의 수동력계를 이용하였다. 수동력계는 터빈에서 생성된 동력을 물을 이용해 흡수하며 토크, 회전수 제어 기능을 수행한다.

Table 1. Specifications for baseline and velocity compound turbine

	Symbol	Baseline		Velocity compound	
		design	similarity	design	similarity
subscript		-	d	-	d
medium		Fuel rich gas	air	Fuel rich gas	air
Pressure Ratio	π	18	18.3	18	18.3
Turbine Inlet total Pressure	P_{01}	5.8 MPa	2.0 MPa	5.8 MPa	2.0 MPa
Turbine Inlet total Temperature	T_{01}	900 K	-	1000 K	-
Velocity Ratio	U/C_{ad}	0.21	0.21	0.17	0.17
Corrected RPM	N^*	367	351	348	317



a) Baseline turbine



b) Velocity compound turbine

Fig. 2 Turbine test facilities

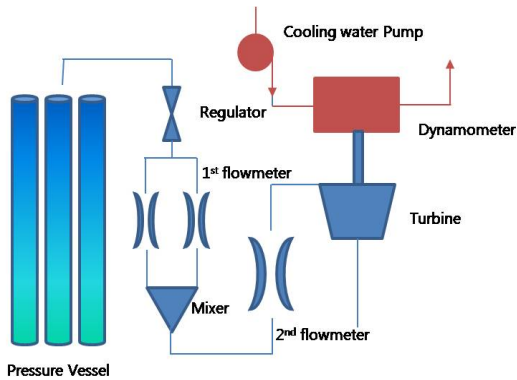


Fig. 3 Schematic diagram of turbine test facilities

2.3 센서 및 불확실도

시험 장치에 장착된 센서는 크게 온도 센서, 압력 센서 그리고 수동력계에서 측정하는 회전수 및 토크 센서가 있다.

온도 센서는 정확도가 높은 4선 타입의 RTD 센서를 사용하였다. 압력 센서는 고정밀의 다이아프램 방식(TJE model, sensotec)의 절대 압력계와 계기 압력계를 사용하였다. 특히 유량계, 터빈입구 등 주요 측정 부위에는 이중으로 계기 압력계와 절대 압력계를 설치하여 그 값의 신뢰도를 높였다.

터빈 성능 시험의 불확실도 해석 결과 효율점 기준으로 $\pm 0.52\%$ 이다. 불확실도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 토크 센서이다. 매 시점 전에 토크 보정을 위해 수동력계에 설치된 토크 보정 장치위에 추를 이용해 보정을 수행하였다. 회전수는 물리적으로 보정이 불가능하기에 수동력계 자체의 회전수 보정용 프로그램을 이용하여 보정을 수행하였다.

3. 성능 시험 결과

3.1 썰 영향

Figure 4는 속도복식 터빈의 내부 구조를 나타내었다. 고압의 가스는 노즐을 지난 후 초음속으로 팽창하여 1열 로터를 지나게 된다. 1열 로터를 지나는 동안 압력의 변화 없이 단지 속도 감

소만 이루어지며 1열 로터를 지난 유동은 리버싱 베인(RV)을 지나면서 단지 방향만 1열 로터 입사각에 맞추어 바뀌게 되고 1열 로터를 지나게 된다.

이중 1열 로터를 지난 유동은 대부분 리버싱 베인(RV)을 통과하게 되지만 일부 유동은 1열 로터와 리버싱 베인 사이의 공간(A)으로 누설이 생길 가능성이 있다. 이 누설을 줄이기 위해 리버싱 베인에 레비린스 썰을 설치하였으며 썰의 간극(A)을 달리 하여 실험을 수행하여 전체 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 5은 리버싱 베인과 안쪽에 설치된 레비린스 썰의 모습이

이다. 썰 간극(A)은 설계 간극 0.8mm 및 0.4mm, 1.1mm, 썰 없음 총 4가지 경우에 대해 성능 실험을 수행하였다.

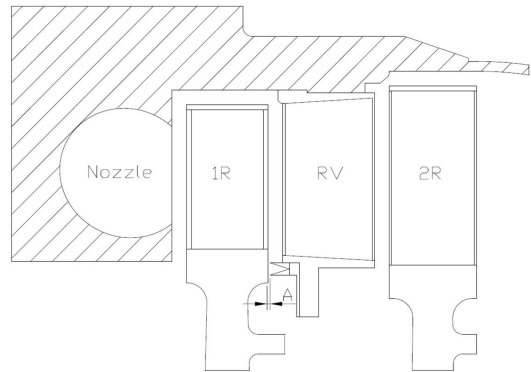


Fig. 4 VC turbine configuration



Fig. 5 Reversing vane

성능 시험은 설계 압력비 대비 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.4 압력비에서 실험을 수행하였으며 각각의 압력비에서 회전수를 변화시키면서 성능 실험을 수행하였다.

성능 시험 결과는 Fig. 6에서 나타내었으며 각 보정 회전수 별로 압력비 대비 효율로 나타내었으며, 각 변수는 상사 설계값으로 무차원하였다. 효율은 썰 간극 별 정확한 효율 비교를 위해 동일한 보정 회전수를 기준으로 비교하였다. 시험 결과 효율은 압력비에 비교적 둔감하고 회전수에 따라 큰 차이를 보이는 전형적인 충동형 터빈의 특성을 나타내고 있다[4]. 이는 기본형 충동형 터빈과 마찬가지로 충동형 로터가 적용된 1열 속도복식에서도 동일하게 나타난다.

썰 간극 시험 결과 썰 간극에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. Table 2에서 썰 간극이 0.4, 0.8, 1.1mm의 경우 상사 설계점 효율은 52.7%로 동일하게 나타났으며 썰이 없는 경우 52.4%의 효율이 나타나 다소 효율 차이가 있는 듯이 보이지만 0.3%의 차이는 센서 불확실도 범위($\pm 0.52\%$)안에 위치하여 성능 차이가 없다고 할 수 있다.

속도복식 터빈에서 썰의 효과가 미미하다는 것은 썰 간극을 통해 누설되는 유동이 미미하여 성능에 크게 영향을 주지 않을 범위라고 할 수 있다. 이것은 로터 전후의 정압 차이가 없는 충동형 터빈의 특성에서 그 원인을 찾을 수 있다. 썰을 통한 누설량은 썰 전후의 압력차에 비례하게 되는데, 이 압력차이가 충동형 터빈에서는 크게 나지 않는다는 것에서 썰을 통한 누설 유량이 크지 않음을 유추할 수 있다.

해외 엔진의 경우 2열식 터빈에서 로터 사이의 썰이 장착된 터빈은 1열 로터와 1열 로터사이의 압력 차이가 존재하는 압력복식 터빈에서 주로 사례를 찾아볼 수 있다. Mark 3 (H-1엔진, Saturn1B 발사체), RL10 A3-3(RL10 A-3-3엔진, Centaur 발사체)등 이 해당된다.

다만, 속도복식 터빈 중에 Mark 10 (F-1엔진, Saturn1C 발사체)은 로터와 리버싱 베인 사이에 썰이 존재하지만, 일반적으로 로터 사이의 썰은 압력차가 존재하는 로터 단에서 그 효과가

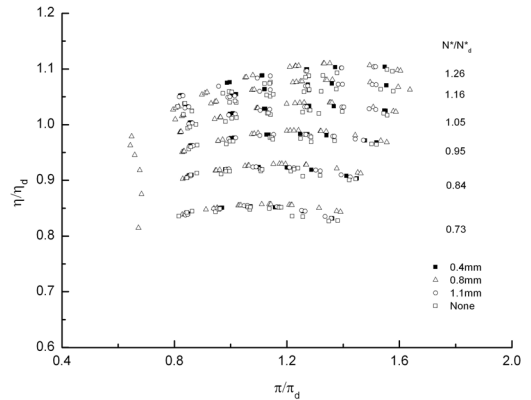


Fig. 6 Seal clearance test result

Table 2. Seal clearance test result

A [mm]	0.4	0.8	1.1	Non-Seal
Efficiency (%)	52.7	52.7	52.7	52.4

더 크다고 알려져 있다[5].

이 실험의 의의는 로터 전후 압력차이가 없게 설계된 속도복식 터빈에서는 썰의 영향이 미미하기에 부품수를 증가시켜서 설치할 필요가 없다는 것을 확인하였다.

하지만, 보통 속도복식 충동형 터빈은 이론적으로는 압력 저하가 없지만 효율 증대를 위해 실제 설계에서는 로터에서 약간의 팽창을 하게 설계를 하게 된다. 이런 경우 로터와 리버싱 베인 사이의 썰은 성능에 영향을 미칠 수 있다.

3.2 터빈 출구압력 변화에 따른 영향

단단으로 구성된 기본형 터빈은 1열 로터 뒤에 출구 유도 정익이 위치하고 있어 1열 로터를 지난 원주 방향 성분의 유동을 출구 방향 유동으로 바꾸어 주는 역할을 수행한다.

반면 속도복식 터빈은 앞서 거론한 바와 같이 1열 로터-리버싱 베인-1열 로터로 이루어져 있다. 출구 유도 정익이 없기에 1열 로터를 지난 유동은 설계 회전수 근방에서 원주 방향의 유동

성분이 최소화 한 채로 출구로 빠져나가게 설계 하였다.

그러므로, 설계 회전수를 벗어난 회전수에서는 1열 로터를 지난 유동은 원주 방향 성분이 많아 지게 된다. 원주 방향 성분의 유동은 후방 압력에 영향을 미치게 되어 원주 방향 유동이 증가 할수록 후방 압력도 상승하게 된다. 이는 곧 손 실로 연결되며, 후방 압력 증가에 따라 압력비가 감소하는 효과가 있게 되어 압력비 감소분만큼 전체적으로 성능을 감소시킨다.

반면 출구 유도 정익을 가진 기본형 터빈은 회전수와는 무관하게 원주 방향 성분을 없애주 어 후방압력에 큰 변화가 없다.

Figure 7은 출구 유도 정익을 가진 기본형 터빈 (Baseline)과 출구 유도 정익이 없는 속도복식 터 빈(Velocity Compound)의 회전수에 따른 압력 비 변화를 나타내었다. 입구 압력을 일정하게 유 지한 채 회전수를 변화시켰으며 그 때의 후방 압력 변화는 압력비의 변화를 의미한다. 각 변수 는 설계값으로 나누어 비교하였다.

여기서 압력비(π)와 보정회전수(N^*)는 각각 다 음과 같이 표현된다.

$$\pi = P_{01}/P_2 \quad (1)$$

$$N^* = \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \quad (2)$$

여기서 P_{01} 은 터빈 입구 전압력, P_2 는 터빈 출 구 정압력, N 은 회전수, T_{01} 은 터빈 입구 전온도 를 의미한다.

기본형 터빈은 $N^*/N^*d=0.6-0.8$ 부근에서는 압 력비가 작아지는 경향을 나타내지만, 그 이후에 서부터는 일정한 경향을 나타낸다. 이것은 시험 초기 유동이 안정화 되지 못하였기 때문에 나타 난 현상이다. 속도 복식 터빈은 설계 회전수 ($N^*/N^*d=1$)까지는 압력비가 증가하지만, 그 이 후는 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 설계점 에서 유동의 원주 방향 성분은 최소화하여 설계 하였기 때문이며 실험 결과 설계 의도대로 설계 점에서 원주 방향 유동 성분이 최소화되었다.

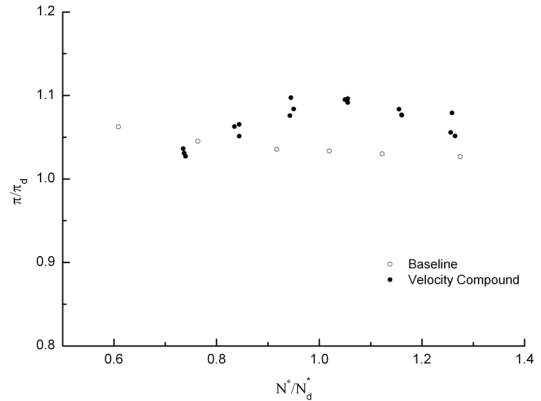


Fig. 7 Turbine outlet pressure

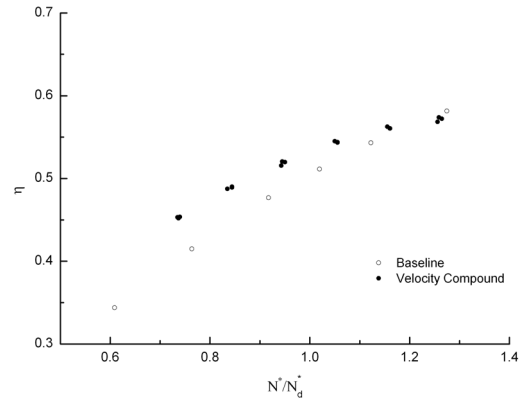


Fig. 8 Total to static efficiency

앞서 거론한 것처럼 초음속 충동형 터빈의 효 율은 회전수에 민감한 반면 압력비에는 둔감한 특성이 있다. Fig. 8에서 속도복식 터빈의 효율 곡선을 보면 설계점 전후의 전체 효율은 회전수 에 따라 계속 증가하며 압력비가 설계점 전후로 크게 변하여도 전체 효율에 크게 영향을 미치지 않는다. 그리고 전반적으로 기본형 터빈에 비해 속도 복식 터빈의 효율이 높게 나타난다. 앞서 거론한 바와 같이 기본형 터빈은 하나의 로터에 서 유동의 속도 에너지를 흡수하는 반면, 속도 복식은 두 개의 로터에서 순차적으로 흡수하 기에 그 효율이 더 높은 것이다.

3.3 손실 특성

참고논문[6]에서는 기본형 터빈의 성능 곡선을 이용하여 노즐의 속도계수를 계산하였다. 속도계수는 전체 성능 곡선에서 계산되었기 때문에 노즐 손실뿐만 아니라 노즐과 로터 사이에 발생하는 손실도 포함되어 있다.

반면 속도복식 터빈의 경우 노즐과 1열 로터-리버싱 베인-1열 로터로 구성되어 있다. 기본형 터빈과 마찬가지로 속도계수를 구하기 위해서는 전체 성능에서 계산되어야 하는데 속도 복식 터빈은 전체 성능에 노즐과 1열 로터, 리버싱 베인 및 1열 로터의 손실이 모두 포함되어 있기에 노즐 및 각 단의 속도계수를 분리할 수 없으므로 기본형 터빈과 비교할 수가 없다.

그러므로 기본형 터빈과 같이 노즐과 1열 로터 그리고 1열 로터에 맞게 설계된 출구 유도 정익으로 구성된 터빈으로 실험을 하여 노즐과 1열 로터의 손실을 분리할 수 있으며 이를 바탕으로 각 단의 손실 특성을 분리해 낼 필요가 있다.

현재 이 손실 특성 파악을 위해 1열 로터만을 위한 출구 유도 정익을 설계 중에 있다.

4. 결 론

1. 속도복식 터빈에서 1열 로터와 리버싱 베인 사이의 누설 유량의 영향을 파악하기 위해 레버린스 썰을 설치하여 썰 간극의 영향을 살펴보았다.

썰 간극은 기준 간격 0.8mm 및 0.4, 1.1, 그리고 썰을 제거한 4가지 경우에 대한 성능 시험을 수행하였다. 시험 결과 간극 변화에 대한 효율 차이는 센서 불확실도 범위 내에 해당되어 차이가 없었다. 이는 충동형 터빈의 특성상 로터 전후 압력 차이가 없기에 누설 유량의 양이 작았으며 전체 성능에 영향을 미치지 않았다고 볼 수 있다.

이 실험의 의의는 로터 전후 압력차이가 없게 설계된 속도복식 터빈에서는 썰의 영향이 미미하기에 부품수를 증가시켜서 설치할 필요가 없

다는 것을 확인하였다. 반면 향후 로터 설계에서 효율 증대를 위해 압력차이가 있게 설계한 경우 썰의 필요성은 있을 것이다.

2. 속도복식 터빈은 로터를 지난 유동을 후방 방향으로 유도해 주는 출구 유도 정익이 없어서 회전 속도에 따라 후방 압력이 차이가 나서 압력비가 변화하였다. 시험 결과 설계 의도대로 설계점에서 압력비가 가장 높았으며, 탈설계점에서는 압력비가 감소하는 결과가 나타났다.

3. 속도복식 터빈의 손실 특성 파악을 위해서는 각 단의 손실 특성을 분리해 내는 것이 중요하다. 현재 이를 위해 1열 로터에 맞는 후방 유도 정익을 설계 중에 있으며 향후 이를 이용하여 손실 특성 실험을 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
2. 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 실매질시험," 한국추진공학회지, 제13권, 제3호, 2009, pp.20-26
3. 정은환, 이항기, 박편구, 김진한, "75톤급 액체로켓엔진 터보펌프용 속도복식 터빈 개발," 한국추진공학회지, 제15권, 제3호, 2011, pp.40-46
4. E. Jeong, H. G. Lee, P. G. Park, J. Kim, "Tip Clearance Effect on the Performance of a Shrouded Supersonic Impulse Turbine," Journal of Propulsion and Power, Vol. 24, No. 6, November-December 2008
5. "Liquid Rocket Engine Turbines," NASA SP-8110, 1974
6. 정은환, 이항기, 박편구, 김진한, "75톤급 액체로켓 엔진 터보펌프 터빈의 성능특성연구," 한국추진공학회지, 제14권, 제5호, 2010, pp.65-71