

## 30톤급 액체로켓 엔진용 터보펌프 터빈 성능시험

정은환\* · 박편구\* · 김진한\*\*

### Performance Test of the 30-ton Class Liquid Rocket Engine Turbopump Turbine

Eunhwan Jeong\* · Pyun Goo Park\* · Jinhan Kim\*\*

#### ABSTRACT

Performance test of the 30-ton class liquid rocket engine turbopump turbine has been conducted using high pressure cold air. Overall performance of the two kinds of turbine rotors - rotor with knife-edged L.E blades and with rounded L.E blades - has been measured for various rotational speed and turbine pressure ratio. The effect of rotational speed and turbine pressure ratio on the turbine axial force behavior also has been measured in parallel. Test results have revealed that the efficiency of knife edged L.E. turbine is a little bit higher than that of rounded L.E. turbine. The axial force of the turbine varied linearly with respect to rotational speed and its magnitude largely depended on turbine pressure ratio.

#### 초 록

실매질 시험용 30톤급 터보펌프 터빈의 성능시험을 수행하였다. 날카로운 익단의 동익과 원호 익단의 동익을 가진 두 종류의 터빈로터에 대한 성능시험을 수행하였으며 아울러 다양한 압력비와 회전수에 따른 터빈 축추력의 변화를 동시에 측정하였다. 시험결과, 날카로운 익단의 터빈로터가 원호익단을 가진 터빈로터에 비해 설계 상사점에서 약 1% 높은 효율을 나타내는 것으로 측정되었다. 터빈 축추력은 회전수에 따라 선형적으로 변화하며 터빈 압력비에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Key Words : Turbopump(터보펌프), Impulse Turbine(충동터빈), Performance(성능), Axial force (축추력)

#### 1. 서 론

현재 한국항공우주연구원에서는 30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프의 개발이 진행중에 있다 [1]. 이 터보펌프는 개방형 액체로켓엔진의 추진제(액체산소와 케로신)를 가압하기 위한 산화제 펌프와 연료펌프, 이들을 구동하기 위한 터빈, 그리고 두 펌프 사이의 기밀유지를 위한 IPS

† 2007년 8월 17일 접수 ~ 2008년 1월 18일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

연락처, E-mail: jeh@kari.re.kr

(inter-propellant seal)를 포함한 실 시스템으로 구성된다. 터보펌프는 시험용 터보펌프에서 시작하여 기본형 터보 펌프, 그리고 실매질 시험용 터보펌프 개발 순으로 진행되었는데 각 단계별로 구성품 설계 성능 검증, 구성품 성능향상 및 조립체 성능 검증, 고온환경하의 터보펌프 성능/신뢰성 및 구조적 안정성 검증등이 순차적으로 이루어졌다. 실매질용 터보펌프는 현재 각 구성품별 성능시험, 조립체 물-공기 상사시험 및 물-고온공기 상사시험등이 완료되었으며 실매질시험을 앞두고 있다. 본 논문에서는 실매질 시험용 터보펌프 터빈의 설계점 및 탈설계점 성능 및 운용조건 변화에 따른 축추력 특성변화 시험 결과를 다루었다.

## 2. 실매질용 터보펌프 터빈

Table 1에는 실매질용 터보펌프 터빈의 설계값을 정리하였다. 단위 유량당 출력을 키우고 무게를 최소화 할 수 있도록 하기 위해 터빈은 고압력비, 1단, 초음속 충동형으로 설계가 이루어졌다. 적은 구동가스 유량환경하에서 적절한 효율 확보를 위해 부분분사형태를 적용하였으며 터빈 구동가스의 모든 팽창은 노즐에서 이루어지도록 하였다. 높은 압력비로 인해 터빈노즐은 수축-확산형태의 축대칭형상으로 설계되었는데 노즐의 초음속 확산부는 유동해석을 통해 전압손실, 출구평균 유동각 편차, 출구압력편차, 출구속도편차 등이 최소화되도록 그 형상을 선정하였다.

Table 1. Turbine Design Values

Parameters		Design Values	Units
Power	$W_t$	1630	kW
Rotational speed	$N$	20000	RPM
Inlet temperature	$T_{00}$	900	K
Pressure ratio	$p_{00}/p_2$	14.5	MPa
Stage loading	$\Delta H/u^2$	4.13	-
Velocity ratio	$u/c_{nd}$	0.25	-
No. of nozzles	$z_n$	11	-

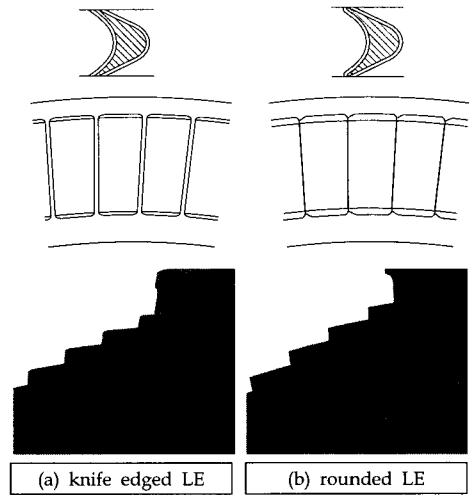
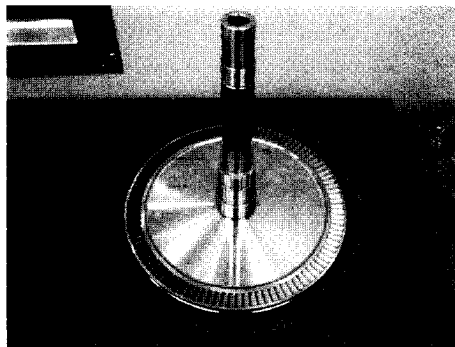


Fig. 1 Turbine blade configurations

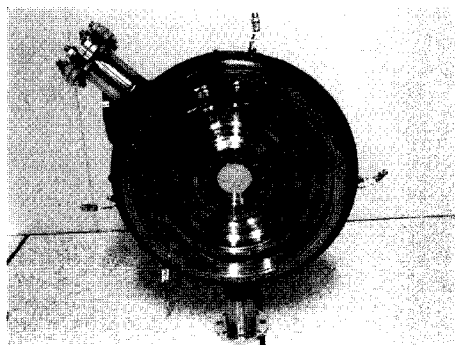
동익의 설계는 주어진 동익 입구 유동조건하에서 터빈 출력을 극대화하기 위해 동익 압력면과 흡입면에서 각각 일정한 압력이 유지되도록 설계하였으며 이러한 유동조건을 구현을 위한 천이구간 형상설계에 MOC기법을 적용하였다. 8종류의 기본익형에 대해 형상을 변화시켜가며 3차원유동해석을 수행하였으며 최종 선정된 동익 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

Figure 1(a)는 실매질용 터빈의 기본익형으로 날카로운 익단(knife edged LE)을 갖도록 설계된 것이며 Fig. 1(b)는 기본익형의 익단에 원호를(rounded LE)를 적용하고 동익 팁과 허브의 필릿 반경을 기본익형에 비해 증가시킨 형상이다. 두 가지의 형상에 대하여 구조 및 유동해석을 수행하여 비교한 결과 동익 형상을 Fig. 1(a)에서 Fig. 1(b)로 변화 시킬 경우 동익에 형성되는 최대응력은 42% 감소하여 열/구조적 안정성이 향상되는 것으로 나타났으나[2] 터빈의 효율은 약 0.9% 감소하는 것으로 예측 되었다.

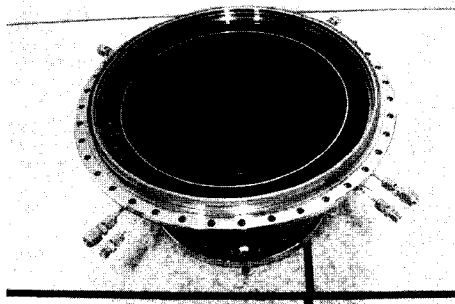
성능평가를 위해 두 가지 형상의 로터를 모두 제작하여 성능시험을 수행하였다. 터빈 로터 재질로는 Inconel 718을 사용하였으며 EDM(Electric discharge machining)을 적용하여 터빈 디스크-동익-슈라우드 일체형으로 제작이 이루어졌다. 노즐블럭 그리고 출구부는 Inconel 625를



(a) turbine rotor



(b) nozzle block



(c) EGV and exhaust duct

Fig. 2 Sub-components of turbopump turbine

적용하였다. Fig. 2는 제작된 실매질용 터보펌프 터빈부를 나타낸다.

### 3. 시험설비 및 시험조건 설정

#### 3.1 시험설비

터빈 성능시험은 고압공기를 이용하여 수행하였다. 고압공기는  $40 \text{ m}^3$  용적의 탱크에 최대압 320기압으로 저장되어 시험에 이용된다. 고압공기는 압력 조절기(pressure regulator)를 통해 적절한 압력으로 감압되며 시험에 필요한 터빈입구의 압력의 조절은 이 압력 조절기를 통해 이루어진다. 공기의 질량유량측정을 위한 유량계는 압력조절기 후방에 설치되어있는데 유량계는 직경 15 mm의 노즐 목을 갖고 있으며 시험 중 초킹(choking) 상태로 운용된다. 시험영역에서의 유량계의 유출계수는 검교정을 통해 확인하였다. 유량계를 통과한 고압공기는 터빈시험부로 공급되어 터빈을 구동한 후 외기로 방출된다. 터빈의 공력성능 확인을 위해 온도 및 압력센서들을 터빈 입구배관, 터빈 노즐출구, 로터출구, 정익출구, 그리고 출구배관으로 구분하여 장착하였다. 특히 로터 전후방에서 측정된 압력값들은 터빈의 축추력을 계산하는데 이용하였다. 온도센서는  $n$ -형 열전대를 사용하였으며 압력센서는 스트레인게이지를 기본으로 한 다이아프램 타입의 고정밀도 시험용 센서(TJE model, Sensotec)를 사용하였다. 터빈의 회전수 및 토오르크의 측정/제어를 위한 동력흡수장치로는 수력동력계(Froude Consine사, model F249)를 사용하였다. 사용된 센서들의 정밀도(accuracy)를 고려한 오차해석 결과 터빈입구온도와 유량계의 영향이 큰 것으로 나타났으며 측정 효율값을 기준으로한 불확실도는 1.8%[3] 이내인 것으로 확인되었다.

#### 3.2 시험조건설정

설계성능은 실제 연소가스와 공기간의 큰 물성 차이 및 초음속 터빈의 특성을 고려하여 설계 압력비를 기준으로 한 상사시험조건1과 노즐 면적비를 기준으로 한 상사시험조건2의 두 가지 시험점에서 확인하였다[3,4](Table2 참조). 터빈시험은 두 시험점을 포함하는 넓은 영역에서 수행하였는데 수력동력계의 가용 운용영역을 고려하여 터빈 압력비 10~25, 회전수 4000~12000 rpm에서 이루어졌다. 터빈압력비를 고정시킨 상태에서 회전수를 변화시켰으며 회전수 별 정속유지

Table 2. Design point similarity test condition

Variables	Units	Design	Similarity1	Similarity2
R	J/kgK	321.4	287.1	287.1
k	-	1.13	1.40	1.40
N	rpm	20000	9168	9625
TIT	K	900	268	268
$U/C_{ad}$	-	0.25	0.25	0.25
Pressure ratio	-	14.5	13.5	20.6
Comments			Pressure ratio based	Nozzle area ratio based

Table 3. Efficiencies at similarity condition

Parameters	Units	similarity1	similarity2
corrected rpm	rpm/ $\sqrt{K}$	561	587
pressure ratio	-	13.5	20.6
velocity ratio	-	0.253	0.253
eff/ eff_d	knife edged LE	-	1.0
	rounded LE	-	0.99

시간은 20초 이상으로 설정하였다.

### 4. 시험결과

#### 4.1 터빈성능특성

Figure 3은 날카로운 익단(knife edged LE)과 둥근익단(rounded LE) 두 종류의 터빈로터에 대하여 수행된 터빈시험결과를 나타낸 것이다. 가로 축을 속도비로 나타냈으며 터빈효율을 압력비/보정회전수에 대한 함수로, 두 종류의 터빈성능을 비교하였다. 효율은 날카로운 익단 터빈, 상사 시험조건1의 축정값( $eff(t-s)_d$ )으로 무차원화하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 날카로운 익단의 터빈로터가 둥근익단에 비해 성능이 약간 높게 나타나는데 이는 초음속터빈의 로터전방에서 일어나는 전압력손실 차이에서 기인하는 것으로

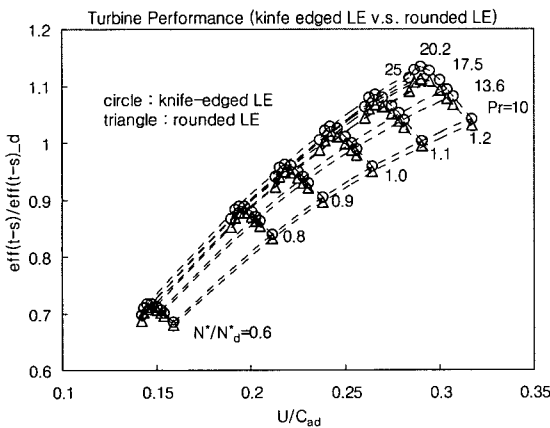


Fig. 3 Turbine Performance Characteristics

볼 수 있다. 2장에서 언급한 바 와 같이 시험에 앞서 수행된 전산유동해석에서 둥근 익단의 터빈효율이 날카로운 익단의 효율에 비해 약 1% 낮게 나타났으며 이 효율 감소는 둥근익단 전방에서 증가된 전압력 손실에서 비롯되는 것으로 확인되었다. 시험대상 터빈의 동익높이는 노즐출구 직경에 비해 15% 크게 설계되었는데 동익 허브와 팁에 존재하는 필릿은 이 영역 내에 존재하기 때문에 노즐 출구유동은 필릿형상에 직접적인 영향을 받지 않는다. 이와 더불어 필릿형상 변화에 따른 동익 유로면적의 변화는 0.7%의 작은 값으로 전체적으로 볼 때 필릿형상 변화는 터빈효율에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 터빈의 효율은 높은 회전수에서 압력비에 따라 상대적으로 크게 변화함을 볼 수 있는데 일정 회전수에서 터빈효율은 상사조건2의 압력비 근방에서 최대값을 나타낸다. 이는 터빈노즐의 완전 팽창 압력비에서 터빈이 최적의 성능을 나타냄을 의미한다[3,4,5].

Table 3은 상사점에서의 효율을 정리한 것이다. 터빈 효율은 상사점1 기준, 초기 예측치의 3%를 상회하는 것으로 나타났는데, 해석 및 시험결과를 통해 볼 때 둥근익단 로터적용에 따른 터빈 성능 저하는 효율 0.9% 이내로 예상되며 예측치를 상회하는 터빈성능을 고려하면 둥근익단 로터는 열/구조적 안정성을 높이기 위해 충분히 고려 가능한 형상으로 판단되었다.

#### 4.2 터빈 축추력 특성

터빈의 작동조건 변화에 따른 축추력 특성 파악은 시험을 통해 측정된 로터전후방의 압력차와 시험 중 터빈주축과 다이내모의 연결부위에 장

착한 변위센서를 이용하였다. 충동형 터빈은 설계 개념상 로터 전후방의 압력이 일정하기 때문에 이론적으로는 로터전후의 축방향 유동모멘텀 차이에 의한 축추력이 대부분을 차지한다. 그러나 부분분사에 따른 이젝션(ejection) 효과등에 의해 터빈디스크 전방은 노즐출구에 비해 상대적으로 낮은 압력이 형성되며 이로 인해 음(주유동의 반대방향)의 축추력을 예상할 수 있다. 그러나 복잡한 유동구조로 인해 정량적인 판단은 실험에 의존할 수밖에 없다. 축추력값은 터빈디스크 전방측정압력과 후방측정압력의 차이에 터빈디스크 면적을 곱하여 추정하였다.

Figure 4에는 보정 회전수 변화에 따른 터빈축추력의 변화를 나타내었다. 축추력은 회전수증가에 따라 선형적으로 변화하는 것으로 나타났으며 그 변화폭은 압력비에 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 시험 영역에서 압력비 20.4 이하에서는 모든 측정 축추력이 음의 값을 나타냈으며 압력비가 낮아질수록 축추력의 절대량은 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 압력비가 낮아짐에 따라 노즐 과대 팽창에 의해 낮아진 터빈로터 전방압력에 기인하는 것으로 판단된다. Table2의 상사조건1, 2에서 축추력은 각각 -0.78 kN, -0.61 kN으로 나타났는데 축방향 유동 모멘텀변화에 따른 축추력 (설계운용조건에서 약 +0.1 kN)을 고려하면 축추력은 더 줄어들 것으로 보인다. 시험결과를 토대로 실제질 운용조건의 터빈 축추력을

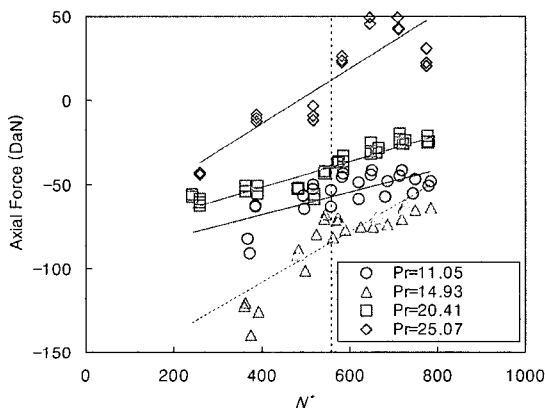


Fig. 4 Variation of turbine axial force

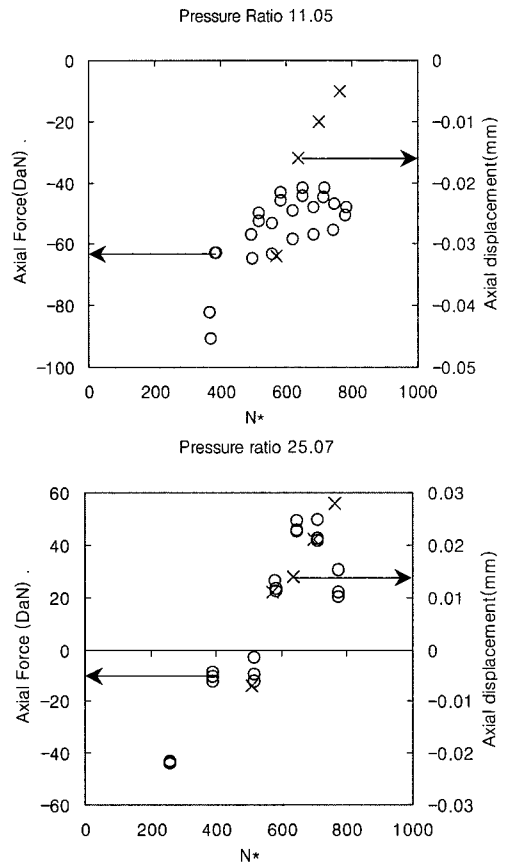


Fig. 5 Comparison of the axial force and axial variation of the turbine shaft

을 계산하면 그 값은 약 -3.1~2.5 kN에 이를 것으로 예상된다. 압력에 의해 환산된 축추력의 방향에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 시험시 레이저 변위센서를 이용하여 터빈 축의 거동을 함께 측정하였으며 Fig. 5에 그 결과를 비교하였는데 그 경향이 일치함을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

30톤급 실매질용 터보펌프 터빈의 공력성능 및 축추력 거동에 대한 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻어내었다.

- 터빈성능측정은 날카로운 익단(knife edged LE)과 둥근 익단(rounded LE)의 두 가지 익형에

대해 수행되었다. 날카로운 익단의 터빈이 약간 높은 성능을 나타내었으며 전체적인 성능은 설계점/탈설계점 모든 영역에서 비슷한 경향을 나타내었다.

- 터빈의 축추력은 회전수에 따라 선형적으로 변화하며 그 크기는 터빈 압력비에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황", 제 25회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2005, pp.375-383
2. Suk-Hwan Yoon, Seong Min Jeon, Jinhan Kim, "Structural Effects of Shrouds and Fillets on Liquid Rocket Turbopump Turbines", The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, October 16-19, 2007, Jeju, Korea, NO. AICFM9-061
3. 정은환, 강상훈, 신동윤, 박편구, 김진한, "터보펌프 터빈의 성능 및 노즐-로터 간극의 영향에 대한 실험적 고찰," 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp.78-86
4. Eunhwan Jeong, Pyun Goo Park, Sang Hun Kang, Jinhan Kim, 2006, Effect of Nozzle-Rotor Clearance on Turbine Performance, FEDSM2006-98388, 2006 ASME Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, July 17-20, Miami, Florida, 2006
5. 정은환, 김진한, "초음속 충동형 터빈에 대한 시험적 고찰," 유체기계저널 제8권 6호, 2005, pp.26-32