

# 초음속 충동형 터빈의 로터 전익 두께가 성능 변화에 미치는 영향

이항기\* · 정은환\* · 박편구\* · 김진한\*

## Rotor leading edge thickness effect on supersonic impulse turbine performance

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

### ABSTRACT

It was investigated that effect of the supersonic impulse turbine rotor leading edge thickness which was the part of 75 ton open cycle liquid rocket engine turbopump. The test for turbine was performed that the rotor thickness to pitch ratio was 1.9 and 1.4 to 30 ton turbine. As a result of test, the rotor with lower thickness(1.4) had 1.5% efficiency gain to the higher thickness(1.9) and the pressure ratio with maximum efficiency was increased to the nozzle full expansion point.

### 초 록

75톤급 개방형 액체로켓엔진에 장착되는 터보펌프의 초음속 충동형 터빈의 로터 전방 두께에 따른 성능 특성 변화의 시험적 연구를 수행하였다. 75톤 터빈 시험에서는 로터 두께 대 피치비가 30톤 로터 대비 각각 1.9배와 1.4배인 로터의 성능을 비교하였다. 시험 결과 로터 두께가 상대적으로 작은 로터의 설계 상사점 효율이 1.5% 상승하였고, 동일 회전수에서 최대 효율이 나타나는 압력비도 증가하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Supersonic Impulse Turbine(초음속 충동형 터빈), Leading Edge Thickness(전익 두께)

### 1. 서 론

한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 한국형 발사체의 개방형 액체로켓엔진의 핵심구성품인 터보펌프를 개발 중이다. 터보펌프는 액체산소를 매질로 하는 산화제 펌프, 케로신을 매질로

하는 연료 펌프, 그리고 가스 발생기에서 생성된 고온 고압의 가스로 펌프의 동력원을 생성하는 터빈으로 구성되어 있다. 현재 항우연에서 개발 완료한 30톤 터보펌프는 액체산소, 케로신의 실매질 환경에서 성공적으로 수행되어 개발이 완료되었으며, 75톤 터보펌프의 개발이 진행 중이다[1]. 터보펌프의 터빈은 높은 단열일을 위해서 큰 팽창비를 갖도록 설계하며 발사체 탑재 요소의 특징인 가볍고 단순한 설계를 위해 모든 팽

\* 한국항공우주연구원 터보펌프팀  
교신저자, E-mail: hglee@kari.re.kr

창은 노즐에서 일어나는 단단형 초음속 충동형을 채택하였다.

## 2. 성능 시험 설비

### 2.1 시험 설비 구성

항우연 내에는 고압 공기 설비가 갖추어져 있어서 터빈 성능 시험은 고압공기 공급 설비를 이용하여 이루어졌다. Fig.1에서 0.9m<sup>3</sup>의 320bar의 고압 용기가 44개가 병렬로 이루어져 있으며, 고압 용기에서 나온 공기는 압력 조절 밸브를 거쳐서 정해진 압력으로 감압 후 유량계, 믹서 및 오피리스를 거쳐 터빈으로 공급된다. 터빈 상사 시험에는 동력 흡수 및 제어를 위해 수동력계를 이용하였다. 수동력계는 터빈에서 생성된 동력 흡수 및 토크, 회전수 제어 기능을 수행한다. Fig. 2는 터빈 성능 시험을 위해 설치된 터빈과 수동력계의 모습이다.

### 2.2 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 다이어프램 방식의 sensotec 및 rosemount 절대 압력계와 게이지 압력계를 사용하였다. 특히 유량계 등 주요 측정 부위에는 이중으로 게이지 압력계와 절대 압력계를 설치하여 그 값의 신뢰도를 높였다. 터빈의 설계점에서

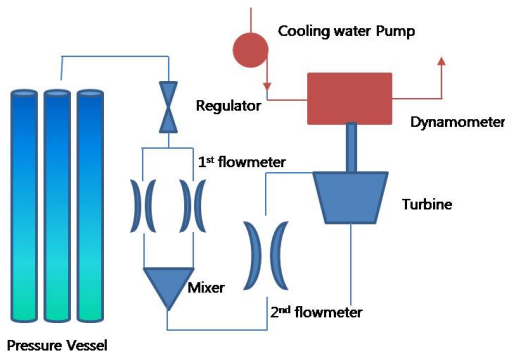


Fig. 1 Schematic diagram of turbine test facilities

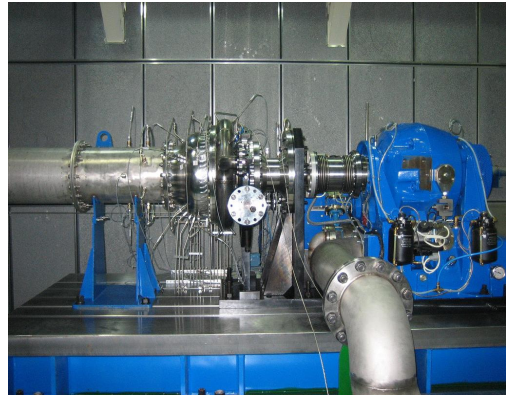


Fig. 2 Turbine test facility

의 불확실도는 측정 효율 기준  $\pm 0.52\%$  로 확인되었다.

## 3. 터빈 성능 특성 및 시험 결과

### 3.1 터빈 성능 특성

수축 확산 노즐을 갖는 초음속 충동형 터빈은 일반적으로 터빈의 압력비가 노즐의 완전 팽창 압력비( $\pi_{sim2}$ )와 일치할 때 최적 효율을 보이게 된다[2]. 초음속 충동형 터빈의 일반적인 특성이며 기 개발된 30톤급 터보펌프 터빈에서도 확인된바 있다[3]. 75톤급 터보펌프 터빈은 로터의 구조적 강도를 높이기 위해 30톤 터빈에 비해 로터의 두께를 증가시켰다. 로터 두께-피치 비율이 30톤 터빈에 비해 1.9배로 설계되었다. Fig.3은 30톤 터빈 성능 시험을 통해 얻은 성능 곡선이다. 그래프에서 점선으로 표시된 선은 각 보정 회전수에서 최대 효율이 나타나는 압력비 지점을 이은 곡선이다. 설계회전수 근방( $N^*/N^*_d=1$ )에서 터빈 압력비가 노즐 완전팽창 압력비와 같은 지점( $\pi/\pi_{sim2}=1$ )에서 최대 효율을 나타낸다. 그러나 Fig.8에서 75톤 터빈(original)의 경우 설계회전수에서 최대 효율이 나타나는 지점이 1.0이 아닌 0.7 부근이다. 이 성능 특성은 노즐 출구의 정압력 분포를 보면 더 확연히 알 수 있다. Fig.4, Fig.5는 각 30톤과 75톤 터빈의 설계 회전수 근방에서 측정한 노즐 출구의 정압력을 터빈

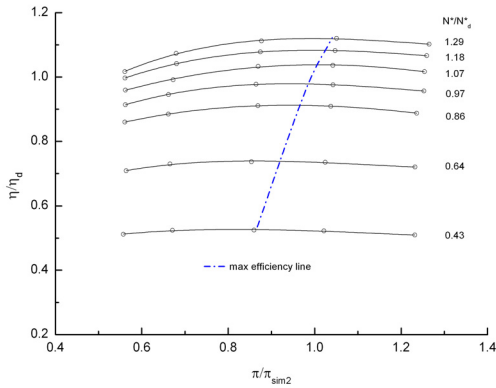


Fig. 3 30 ton turbine performance

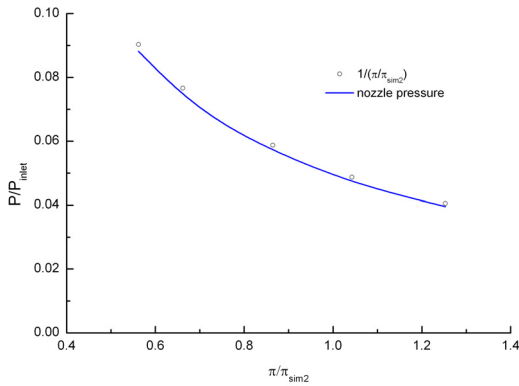


Fig. 4 30ton turbine nozzle outlet pressure

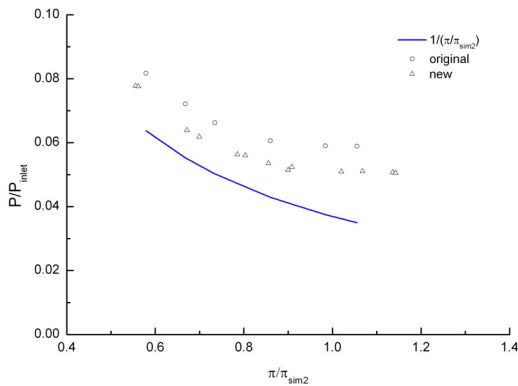


Fig. 5 75 ton turbine nozzle outlet pressure original and new rotor

입구 전압력으로 나눈 값의 분포이다. 실선은 압력비의 역수를 나타내며, 로터 전후의 압력이 같은 충동형 터빈의 특성상 노즐 출구 정압력을 터빈 입구 전압력으로 나눈 값은 이 압력비의 역수에 근접해야 한다. Fig.4에서 30톤 터빈의 경우 노즐 출구 정압력 분포가 이 실선을 잘 따르고 있음을 알 수 있으나, Fig.5 75톤 터빈 (original)은 상대적으로 높은 정압력 분포를 나타내고 있다.

이는 30톤 터빈에 비해 상대적으로 두껍게 설계 제작된 로터로 인해 로터 입구의 충격파의 강도가 높아짐으로 인해 전압력 손실 및 로터 입구 압력의 상승으로 인해 실제 터빈의 작동 압력비를 낮추는 결과를 초래한다. 그 결과 로터 전의 두께를 감소시킴으로 효율 증가 효과를 얻을 수 있음을 시사한다.

### 3.2 개선된 로터 형상

개선된 로터는 Fig. 6에서 기존 로터의 날개 및 압력/흡입면의 형상을 동일하게 유지한 채, 전방 두께를 줄인 형상을 나타낸다. 두께 대 피치비를 30톤 터빈 대비 1.9배인 기존 형상(original)에 비해 1.4배로 두께를 줄인 개선형 로터(new)는 30% 두께 감소에 따라 로터의 최소 유류 면적은

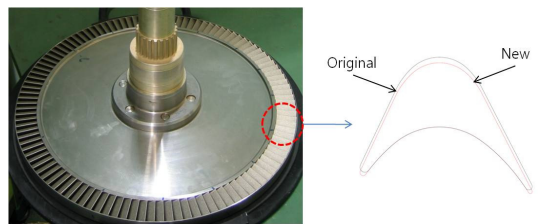


Fig. 6 turbine rotor blade - original and new

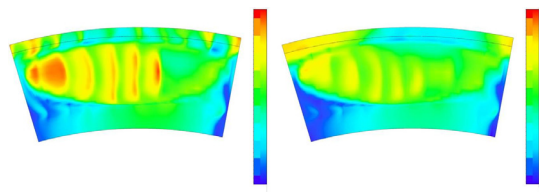


Fig. 7 (a) original (b) new Static pressure at rotor inlet

약 10% 증가하였다. 75톤 기존 로터형상(original)과 두께를 감소시킨 새로운 로터 형상(new)을 바탕으로 CFD 해석을 수행한 결과 Fig.7 에서처럼 노즐 출구의 정압력이 기존 로터에 비해 낮은 정압력 분포를 나타내고 있으며 효율은 약 3% 증가하였다.

### 3.3 성능 시험 결과

기존 로터(original)과 개선 로터(new)을 장착한 터빈의 성능시험을 수행하여 그 영향을 비교하였다. 압력비에 따라 회전수를 변화시키면서 성능 시험을 수행하였으며 모든 변수는 완전팽창 상사 설계점 기준으로 무차원하였다.

기존 로터와 개선된 로터의 정확한 성능 비교를 위해 두 실험의 동일한 보정회전수를 기준으로 비교하였다. 실험 결과 Fig.8과 같이 기존 로터 대비 개선 로터의 전체적인 효율이 상승하였다. 상사 설계점 기준 효율은 약 1.5% 증가하였다.

동일한 보정회전수에서 최대 효율이 나타나는 압력비가 기존 로터에 비해 개선 로터에서 더 증가하는 방향으로 나타났다. 이는 충동형 터빈의 특성상 노즐에서 완전 팽창되는 압력비에서 가장 높은 효율이 나타남을 고려하면 로터 두께의 감소로 인해 충격파의 강도가 약해짐에 따라 전압 손실 감소 및 로터 전방의 압력 감소로 압력비가 증가하여 노즐의 완전 팽창 압력비에 더 가까워진다고 할 수 있다. 반면, 실험결과와 효율 증가량이 CFD 해석과 차이가 나는 것은 로터 제작과정에서 설계치수보다 다소 두껍게 제작이 되어 두께 감소에 의한 영향 폭이 줄었다고 해석할 수 있다.

그리고 Fig.5의 기존 로터(original)과 개선 로터(new)의 노즐 출구압을 비교해 보면, 개선 로터가 기존 로터에 비해서는 노즐 출구압이 낮아졌지만 아직도 실선과 차이가 있다. 30톤 터빈에서 노즐 출구압이 실선과 거의 일치하는 것과 비교해볼 때 30톤 대비 두께-피치 비율이 1.4 배라는 것은 로터 두께를 더 감소시켜 성능 향상을 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

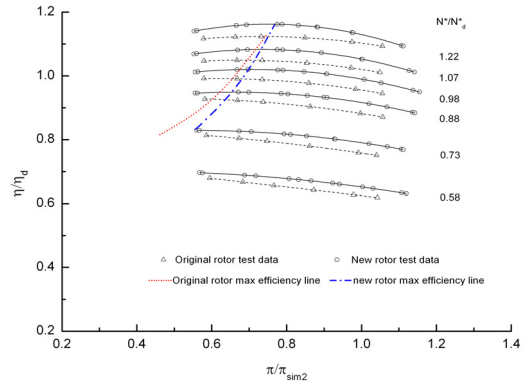


Fig. 8 75 ton turbine performance (original rotor and new rotor)

## 4. 결 론

로터 전방 두께가 성능에 미치는 영향을 연구하기 위해 로터의 두께 대 피치비가 각각 30톤 터빈에 비해 1.9배와 1.4배인 로터를 장착한 터빈 성능 시험을 수행하였다. 시험 결과 두께 대 피치비가 1.9배인 기존 로터 대비 1.4배인 개선 로터의 효율이 상사 설계점 기준으로 1.5% 증가하였으며, 최대 효율이 나타나는 압력비도 완전 팽창 압력비 쪽으로 증가하였다.

## 참 고 문 헌

1. 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
2. 정은환, 강상훈, 신동윤, 박편구, 김진한, "터보펌프 터빈의 성능 및 노즐-로터 간극의 영향에 대한 실험적 고찰," 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp.78-86
3. 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