

技術論文

## 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 조립체의 상사매질 성능시험

홍순삼\*<sup>†</sup> · 김진선\* · 김대진\* · 김진한\*\*

### Performance Test of Turbopump Assembly for 75 Ton Liquid Rocket Engine Using Model Fluid

Soon-Sam Hong\*<sup>†</sup> · Jin-Sun Kim\* · Dae-Jin Kim\* · Jinhan Kim\*\*

#### ABSTRACT

Performance test of a full-scale turbopump assembly for a 75 ton class liquid rocket engine was carried out at full speed. Model fluid was used as a working medium: liquid nitrogen for the oxidizer pump, water for the fuel pump, and hot air for the turbine. The turbopump was operated stably, satisfying the performance requirements. Head coefficient and flow coefficient of the pumps remained constant at the speed-increasing period. In terms of performance characteristics of pumps and turbine, the results from the turbopump assembly test showed a good agreement with those from the turbopump component tests.

#### 초 록

추력 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 조립체 실물형에 대하여 정격 회전수에서 성능시험이 수행되었다. 실매질 대신 상사매질을 사용하였는데 산화제펌프에는 액체질소, 연료펌프에는 물, 터빈에는 고온 공기가 공급되었다. 시험 중 터보펌프는 안정적으로 운전되었으며 성능 요구조건을 만족시켰다. 운전 초기의 회전수 상승구간에서도 펌프의 양정계수와 유량계수는 일정하게 유지되었다. 터보펌프 단품 성능시험과 조립체 성능시험 결과를 비교할 때 펌프 양정계수와 터빈 효율이 두 종류의 성능시험에서 비교적 잘 일치하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Pump(펌프), Turbine(터빈), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Performance Test(성능시험)

접수일 2010. 12. 3, 수정완료일 2011. 3. 4, 게재확정일 2011. 3. 10

\* 정희원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail: sshong@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### 1. 서 론

터보펌프는 액체로켓엔진에서 추진제를 가압하여 연소실로 공급하는 역할을 한다. 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 액체산소와 케로

신을 추진제로 하는 가스발생기 사이클의 추력 75톤급 액체로켓엔진에 적용 가능한 터보펌프를 개발하고 있으며 이는 30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발 경험[1, 2]을 바탕으로 하고 있다. 75톤급 터보펌프는 30톤급 터보펌프와 유사하게 단단 원심형의 산화제펌프와 연료펌프, 그리고 단단 축동형의 터빈으로 구성되어 있으며 한 개의 터빈이 동일 축에 있는 두 개의 펌프를 구동하는 형식이다. 터보펌프에서 연소실로 공급되는 추진제의 일부가 가스발생기로 공급되며, 여기에서 연소되어 생성된 고온/고압 가스가 터보펌프의 터빈에 공급되어 터보펌프가 작동된다. 본 시험에 사용된 터보펌프가 Fig. 1에 제시되어 있다.

제작된 터보펌프에 대한 상사매질 성능시험은 먼저 각 구성품에 대하여 수행된 후 조립체를 대상으로 이루어졌는데, 이 시험들은 항우연내의 시험설비를 이용하여 수행되었다. 이 시험설비는 30톤급 터보펌프 성능시험에[3, 4] 사용된 것으로서 75톤급 터보펌프를 시험하기에는 설비 용

량이 부족하여 연속시험시간, 시험회전수 등이 제한된다. 펌프 단품 상사 성능시험에서는 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하며 이 시험을 통하여 펌프의 양정-유량 특성, 효율-유량 특성, 캐비테이션 특성, 그리고 축추력특성이 얻어진다[5]. 한편, 터빈 단품 상사 성능시험에서는 상온의 공기를 매질로 하고 터빈 동력은 수력동력계로 측정되며, 이 시험을 통하여 터빈 효율 곡선이 보정회전수와 압력비의 함수로 얻어진다[6].

터보펌프 조립체 시험에서는 산화제펌프-연료펌프-터빈 조립체의 동력균형이 점검되며, 또한 실(seal) 및 베어링의 작동 및 터보펌프의 진동특성이 점검된다. 본 연구에서는 개발 중인 추력 75톤급 터보펌프 조립체에 대하여 수행된 상사매질 성능시험에 대하여 고찰한다.

## 2. 시험설비 및 시험조건

본 연구에는 시험의 안전성을 고려하여 터보펌프 조립체 시험에 실제 매질 (산화제펌프에 액체산소, 연료펌프에 케로신, 터빈에 고온의 가스발생기 가스) 대신 상사매질 (산화제펌프에 액체질소, 연료펌프에 물, 터빈에 고온 공기)을 사용하였다. 30톤급 터보펌프 조립체 시험의 경우에도 상사매질로서 액체질소-물-고온공기[7]가 이용되었다.

유동시험에서 상사시험 조건은 일반적으로 기하학적 상사조건과 동력학적 상사조건으로 구성된다. 먼저, 본 시험에서는 실물크기의 터보펌프를 사용하기 때문에 기하학적 상사조건을 만족시킨다. 그리고 동력학적 상사 변수로는 레이놀즈수, 마하수, 입구 유동각(속도삼각형) 등이 있다. 터보기계에서 회전체 날개끝 속도와 날개 직경을 기준으로 한 레이놀즈수가  $10^6$  이상이면 레이놀즈수 영향이 적다고 알려져 있는데[8], 본 시험의 경우 정격회전수에서 펌프와 터빈의 레이놀즈수가  $10^7$  이상이므로 레이놀즈수의 영향은 크지 않을 것으로 보인다. 터빈의 경우 터빈 압력비를 실제 시험과 맞추어서 로터 입구 마하수

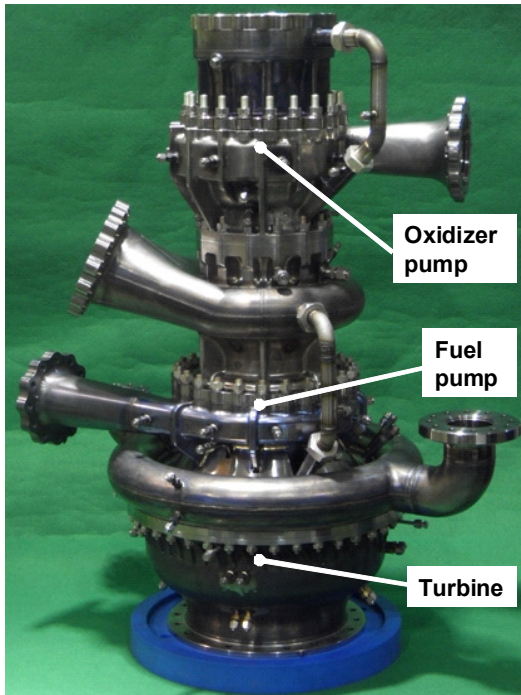


Fig. 1 Turbopump assembly for test

를 맞추어준다. 또한 펌프와 터빈에서 공통적으로 회전체 입구의 유동각(혹은 속도삼각형)을 실제 시험과 맞춘다. 펌프의 경우 유량계수를 맞추므로써, 그리고 터빈의 경우 속도비(혹은 보정 회전수)를 맞추므로써 입구 유동각을 실제시험과 동일하게 한다. 따라서 본 시험의 경우 상사매질을 사용하고 있지만 기하학적 상사조건 및 동력학적 상사조건을 만족시키고 있으므로 그 시험 결과가 실매질을 사용하는 경우와 유사할 것으로 예측된다. 실제로 추력 30톤급 터보펌프의 경우에 상사매질 시험과 실매질 시험의 결과가 서로 유사한 것을 확인할 수 있었다[2].

터보펌프 조립체 시험 설비의 구성도를 Fig. 2에 제시하였다. 산화제펌프에는 5 m<sup>3</sup> 용량의 액체질소 탱크 2개를 두고 공급탱크에서는 펌프로 액체질소를 공급하고 회수탱크에서는 펌프에서 배출되는 액체질소를 받는다. 연료펌프에는 3 m<sup>3</sup> 용량의 물탱크 1개를 두어 운전 중 연료펌프가 물탱크로부터 물을 흡입하여 다시 이 물탱크로 물을 배출한다. 두 펌프 모두 펌프 양정을 얻기 위하여 펌프의 입구와 출구 배관에 압력과 온도가 측정되고 펌프 유량은 입구 배관에 설치된 터빈식 유량계로 측정한다. 펌프 출구 배관에 오리피스를 설치하여 운전 중 펌프 유량계수가 고정되도록 하였다. 원하는 유량계수가 얻어지도록 시행착오를 거쳐 오리피스 내경이 결정된다.

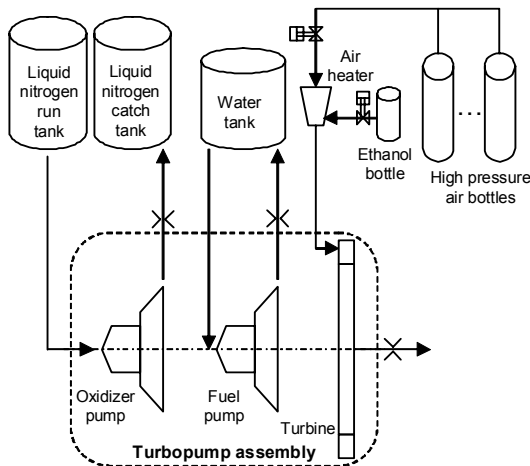


Fig. 2 Schematic of turbopump assembly test

터빈을 구동하는 고온/고압의 가스는 공기가 열기에서 고압공기에 에탄올을 연소시켜 생성된다. 30톤급 터보펌프 시험의 경우에는 공기가 열기 1대를 사용하였으나 75톤 터보펌프 시험에서는 동일 규격의 공기가 열기 1대를 추가하여 총 2대를 병렬로 연결하여 사용하였고, 각각의 공기가 열기에 공급되는 공기 유량도 30톤급 시험에 비하여 증가시켰다. 본 시험의 경우 정속 회전수 구간에서 터빈에 공급되는 가스의 유량은 약 12 kg/s이다. 터빈의 입구와 출구배관에서 온도와 압력이 측정된다. 터빈 가스 유량은 공기가 열기 전방에서 임계유동 벤투리 노즐로 측정된 공기 유량과 터빈식 유량계로 측정된 에탄올 유량을 합하여 계산한다. 터빈 출구 배관에는 오리피스를 설치하여 운전 중 원하는 터빈 압력비를 얻을 수 있도록 하였다.

75톤급 터보펌프 조립체 시험 장면을 Fig. 3에 제시하였다. 터보펌프는 지면에 수직으로 세워진 상태에서 운전된다. 그림에서 위쪽이 산화제펌프 입구방향이고 아래쪽이 터빈 출구 방향이다. 이 그림은 시험 후 촬영한 사진으로서 산화제펌프에 아직 성애가 형성되어 있는 것이 관찰된다.

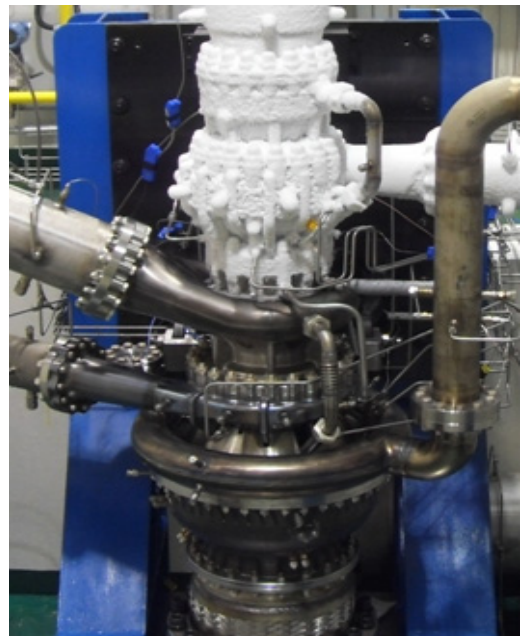


Fig. 3 Configuration of turbopump assembly test

3. 성능시험 결과

시험 중 터보펌프가 안정적으로 작동되었으며, 터보펌프 안정성에서 중요한 진동특성 및 실(seal)의 동작이 양호한 특성을 보였다. 그리고 시험 후 터보펌프를 분해하여 검사한 결과 모든 부품 상태가 양호하였는데, 검사는 부품에 따라서 육안검사, 치수검사, 형광침투검사 등이 이루어졌다. 이후 제시되는 성능시험 결과에서는 먼저 시간에 따른 성능 파라미터의 변화를 다룬 후 터보펌프 단품 성능시험과 조립체 성능시험의 비교를 다룬다.

3.1 시간에 따른 터보펌프 성능 파라미터의 변화

시험 중 시간에 따른 터보펌프 회전수(N)와 터빈 입구 압력( $P_{tb\_in}$ )을 Fig. 4에 제시하였다. Time =20sec경 터보펌프 회전수는 10,850 rpm에 도달하였으며 이는 정격 회전수인 11,000 rpm의 98.6%에 해당된다. 시간에 따른 터보펌프 회전수

변화는 시간에 따른 공기가열기의 작동 조건에 의하여 결정되며, 본 시험에 사용되는 공기가열기의 운전 특성은 점화 후 압력이 단계별로 점차 증가하여 Time=16sec경 일정 압력에 도달하게 되고 이후 이 압력이 계속 유지되는 것이다 (Fig. 4). 따라서 터보펌프 회전수도 시간에 따라 점차 증가하여 Time=16sec경부터 일정하게 유지된다. 터보펌프 정속 운전이 Time=20sec경 종료된 것은 액체질소 탱크 용량이 충분하지 않기 때문이며 차후 탱크 용량을 증설하여 터보펌프 운전 시간을 증가시킬 계획이다.

Figure 5에는 시간에 따른 펌프의 유량을 표시하였는데, 산화제펌프와 연료펌프의 유량은 터보펌프 회전수에 비례하여 시간에 따라 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6에는 펌프 출구 압력을 표시하였는데, 산화제펌프와 연료펌프의 출구압력은 회전수가 증가함에 따라서 증가하고 있다.

Figure 7에는 시간에 따른 산화제펌프(op)와 연료펌프(fp) 양정계수와 유량계수를 표시하였는

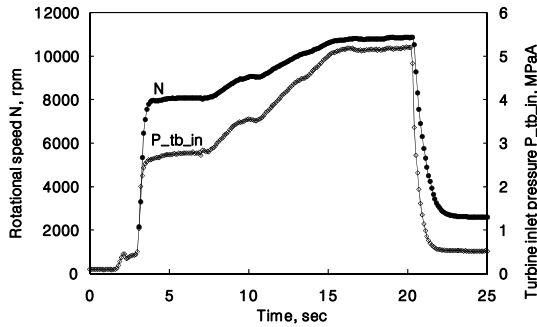


Fig. 4 Rotational speed and turbine inlet pressure

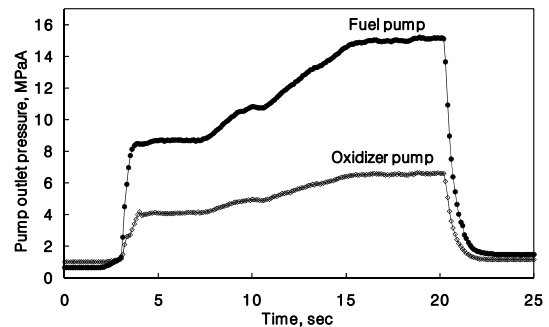


Fig. 6 Outlet pressure of pumps

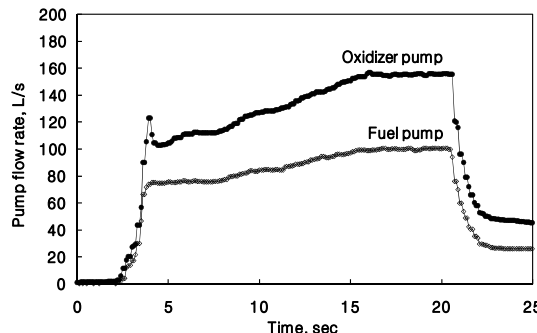


Fig. 5 Flow rate of pumps

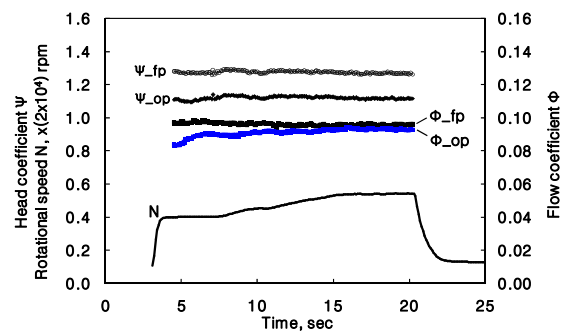


Fig. 7 Head coefficient and flow coefficient of pumps

데, 이 계수의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Head coefficient } \psi = \frac{\Delta p}{\rho u_{2t}^2 / 2} \quad (1)$$

$$\text{Flow coefficient } \phi = Q / A_1 u_{1t} \quad (2)$$

여기서  $\Delta p$ 는 펌프의 압력상승,  $\rho$ 는 펌프 유체의 밀도,  $u_{2t}$ 는 임펠러 출구의 팁 속도,  $Q$ 는 펌프 체적유량,  $A_1$ 은 인듀서 입구에서 허브와 팁 사이의 유로 면적,  $u_{1t}$ 는 인듀서 입구에서 팁 속도이다. 그리고 팁 속도  $u_{1t}$ 와  $u_{2t}$ 는 터보펌프 회전수에 비례한다. Fig. 5 및 Fig. 6에서 펌프 유량과 양정(펌프 출구 압력을 펌프 양정으로 볼 때)이 시간에 따라 증가하는데, 이를 무차원화 하면 Fig. 7에서 보는 바와 같이 그 값이 시간에 따라 일정한 분포를 보인다. 이로부터 본 시험에서 산화제펌프와 연료펌프의 양정과 유량의 경우 회전수 상사 법칙이 잘 만족됨을 알 수 있다. 본 시험에서는 펌프가 설계 유량계수에서 작동하도록 의도하였으나 시험 결과 산화제펌프와 연료펌프 모두 설계값 대비 95% 수준에서 시험이 이루어졌고 따라서 다음 시험에는 펌프 출구 오리피스 내경을 증가시킬 예정이다.

### 3.2 터보펌프 단품 성능시험과 조립체 성능시험의 비교

펌프 단품 성능시험 결과와 본 시험의 터보펌프 조립체 시험 결과를 비교하여 양정계수-유량계수의 형태로 Fig. 8에 제시하였다. 터보펌프 조립체시험 결과는 시험 후반부의 정속구간 중에서 Time=19~20sec 구간의 값을 평균하여 얻었다. 펌프 단품 성능시험은 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하였으며, 시험 회전수는 정격 회전수의 50% 내외로 하였다. Fig. 8에서 터보펌프 조립체 시험 결과는 기호로 표시하였는데, 각 펌프에서 1개의 운용점이 표시된다. Fig. 8을 보면 각 펌프에서 단품시험과 조립체 시험의 두 결과가 양호하게 일치하는 것을 알 수 있다. 연료펌프의 경우 동일한 유량계수에서 조립체시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 1.5% 더 작았다. 산화제펌프의 경우

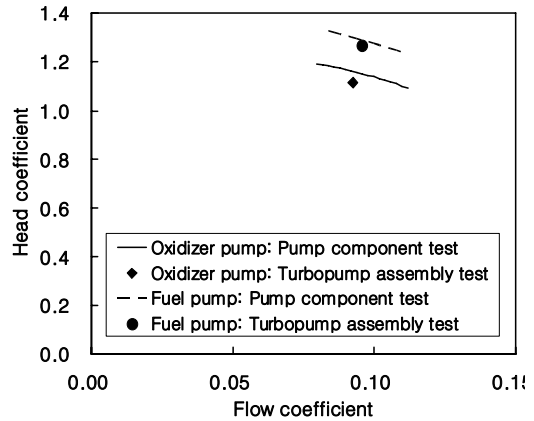


Fig. 8 Head coefficient vs. flow coefficient of pumps

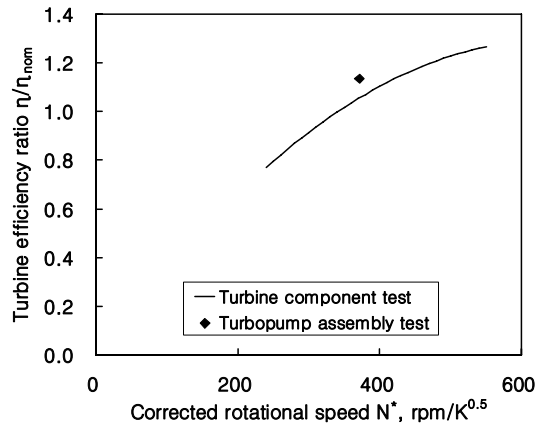


Fig. 9 Efficiency vs. corrected rotational speed of turbine

조립체시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 약 4% 더 작는데, 극저온 매질에서 운전되는 경우는 물에서 운전되는 경우에 비하여 동일한 유량에서 펌프 양정이 약간 감소한다고 알려져 있으며, 이는 두 매질의 점성계수 차이로 인한 체적효율 차이 때문에 발생한다.

터빈 단품 시험 결과와 본 시험의 터보펌프 조립체 시험 결과를 터빈의 효율-보정회전수 형태로 Fig. 9에 제시하였다. 그림에서 터빈 효율( $\eta$ )은 정격의 값( $\eta_{nom}$ )으로 나누어 표시하였다. 터빈 단품 시험은 상온의 공기를 매질로 하고 수력동력계로 터빈에서 생성되는 동력을 측정하며, 시험 회전수는 정격의 50% 내외로 하였다.

터빈 단품 시험을 통하여 보정회전수의 함수로 터빈 효율을 얻을 수 있다. 이 터빈 효율을 Fig. 9에 곡선으로 표시하였다. 터빈의 보정회전수는 다음과 같이 정의된다.

$$N^* = N / \sqrt{T_{00}} \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 터빈 회전수이고  $T_{00}$ 은 터빈 입구 전 온도이다. 본 시험에서 각각의 펌프에 소요되는 동력(펌프 수동력( $Q \times \Delta p$ ))을 펌프 효율로 나눈 값을 합한 후 이를 터빈 단열 동력으로 나누어 얻은 값이 Fig. 9에 기호로 표시된 조립체 시험의 터빈 효율이다. Fig. 9를 보면 터빈의 조립체 시험 효율이 단품 시험 효율에 비하여 상대적으로 4% 더 높다. 터보펌프 조립체 시험의 터빈 효율이 터빈 단품시험의 효율보다 높은 것은 조립체 시험이 단품시험에 비하여 시험회전수가 높기 때문인 것으로 보인다. 터보기계에서 보통 회전수가 증가하면 레이놀즈수가 증가하여 효율이 향상되는데, 이 효과로 인하여 터보펌프 조립체 시험에서 펌프와 터빈의 효율이 각각의 단품시험에 비교하여 향상된다면 Fig. 9의 효율 차이가 설명된다. 한 가지 유의사항으로, 본 시험에서 정속구간이 후반부 4초 가량으로서 짧은 시간이기 때문에 터보펌프가 아직 정상상태에 도달하기 이전이라고 볼 수 있으므로 펌프-터빈의 정량적인 동력균형 점검에 이로운 오차가 있을 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

개발 중인 추력 75톤급 실물형 터보펌프에 대하여 산화제펌프에는 액체질소, 연료펌프에는 물, 터빈에는 고온 공기를 사용한 상사매질 시험이 정격회전수에서 수행되었다.

터보펌프는 약 16초 동안 정격의 70% 이상의 회전수에서 운전되었고 이 중 후반부 약 4초 동안은 정격의 98% 회전수에서 운전되었다. 시험 중 터보펌프가 안정적으로 작동되었으며 시험 후 터보펌프를 분해하여 검사한 결과 모든 부품 상태가 양호하였다.

시간에 따라 회전수, 펌프 유량, 펌프 양정이 증가하지만 이를 무차원화한 펌프의 양정계수와 유량계수는 일정한 값을 보였다. 그리고 터보펌프 단품 성능시험과 조립체 성능시험 결과를 비교할 때 펌프 양정계수와 터빈 효율이 두 종류의 성능시험에서 비교적 잘 일치하였다.

시험 중 운전시간이 짧은 것은 설비 용량의 한계 때문이었으며 차후 이 설비를 증설하여 운전시간을 증가시킬 예정이다.

#### 참 고 문 헌

1. 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
2. 홍순삼, 김진선, 김대진, 김진한, "30톤급 엔진용 터보펌프 실매질 고온시험," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2009, pp.11-17
3. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2005, pp.375-383
4. Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H., Jeon, S. M., "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine," Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH., AIAA 2007-5516, 2007
5. 김대진, 홍순삼, 최창호, 노준구, 김진한, "75톤급 로켓엔진용 연료펌프의 수력성능시험," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2009, pp.78-81
6. 이항기, 정은환, 김진한, "초음속 충동형 터빈의 성능에 대한 시험적 고찰," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2009, pp.561-565
7. 홍순삼, 김진선, 김대진, 김진한, "터보펌프 조립체의 고온 성능시험," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2008, pp.349-350
8. Balje, O. E., Turbomachines, John Wiley & Sons Inc., 1981