

30톤급 엔진용 터보펌프 실매질 고온시험

홍순삼* · 김진선* · 김대진* · 김진한*

Hot-Fire Test of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine in Real Propellant Environment

Soon-Sam Hong* · Jin-Sun Kim* · Dae-Jin Kim* · Jinhan Kim*

ABSTRACT

Hot-fire test of a turbopump for a gas generator cycle rocket engine of 30 ton class was carried out in real propellant environment. Liquid oxygen and kerosene were used for the oxidizer pump and the fuel pump, respectively, while hot gas produced by the gas generator was supplied to the turbine. A part of the propellant discharged from the pumps was provided to the gas generator. The turbopump was run stably at both on-design and off-design conditions, satisfying all the performance requirements. This paper describes one of the test cases, where the turbopump was run for 120 seconds at three different operating modes in one test. In terms of performance characteristics of pumps and turbine, the results from turbopump assembly test using real propellant showed a good agreement with those from the turbopump component tests using simulant working fluid.

초 록

가스발생기 사이클의 추력 30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프에 대하여 실매질 고온 시험이 이루어졌다. 산화제펌프와 연료펌프에는 각각 액체산소, 케로신이 공급되고 터빈에는 고온의 가스가 공급되며 이 가스는 펌프로부터 배출되는 추진제의 일부를 가스발생기에서 연소시켜 생성된다. 터보펌프는 시험 중에 설계점과 탈설계점의 전 영역에서 안정적으로 작동하였고 성능 요구 조건을 만족시켰다. 본 논문에서는 여러 차례의 시험 중에서 단일 운전으로 세 운용점에서 총 120초간 작동된 경우에 대하여 터보펌프에 관심을 두고 시험결과를 소개한다. 펌프와 터빈의 성능 특성 관점에서 터보펌프 조립체의 실매질 고온 시험 성능시험 결과와 터보펌프 구성품의 상사 성능 시험 결과가 양호하게 일치하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Gas Generator(가스발생기), Hot-Fire Test(고온시험), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Pump(펌프), Turbine(터빈)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀
연락처, E-mail: sshong@kari.re.kr

터보펌프는 액체로켓엔진에서 추진제를 가압

하여 연소실로 공급하는 역할을 한다. 현재 한국 항공우주연구원(이하 항우연)에서는 액체산소와 케로신을 추진제로 하는 가스발생기 사이클의 30톤급 액체로켓엔진에 적용 가능한 터보펌프를 개발하고 있다[1-3]. 이 터보펌프는 단단 원심형의 산화제펌프와 연료펌프, 그리고 단단 충동형의 터빈으로 구성되어 있으며 한 개의 터빈이 동일 축에 있는 두 개의 펌프를 구동하는 형식이다. 두 펌프 사이에 IPS(Inter-propellant seal)를 두고 퍼지하여 두 추진제의 접촉을 막는다. 터보펌프에서 연소실로 공급되는 추진제의 일부가 가스발생기로 공급되며 여기에서 연소되어 생성된 고온/고압 가스가 터보펌프의 터빈에 공급되어 터보펌프가 작동된다. 본 시험에 사용된 터보펌프가 가스발생기와 조립된 형태로 Fig. 1에 제시되어 있다.

제작된 터보펌프에 대한 성능시험은 먼저 상사매질을 이용하여 단품시험 및 조립체시험이 이루어진 후 실매질을 이용하여 조립체시험이 이루어진다. 상사매질을 이용한 시험에는 펌프 단품 성능시험, 터빈 단품 성능시험, 조립체 성능시험 등이 있으며 이 시험들은 항우연내의 시험설비를 이용하여 수행된다[1, 2]. 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[4, 5]. 한편, 터빈 단품 상사 성능시험에서는 상온의 공기를 매질로 하고 터빈 동력은 수력동력계로 측정되며 이 시험을 통하여 터빈 효율 곡선이 터빈 속도비와 압력비의 함수로 얻어진다[6, 7]. 터보펌프 조립체 상사 성능시험에서는 산화제펌프 및 연료펌프에는 상온의 물을 매질로 하고 터빈에는 고온/고압 공기를 매질로 하여 터보펌프 조립체가 정격회전수에서 운전되며 이 시험을 통하여 상사매질에서의 터보펌프 운전의 안전성, 펌프-터빈의 동력 균형 등이 점검된다[8]. 본 시험에 사용된 터보펌프의 경우 먼저 상기의 상사매질을 이용한 단품 및 조립체 성능시험이 이루어졌고 이후 실매질을 사용하여 국외에서 터보펌프-가스발생기 연계시험이 이루어졌다.

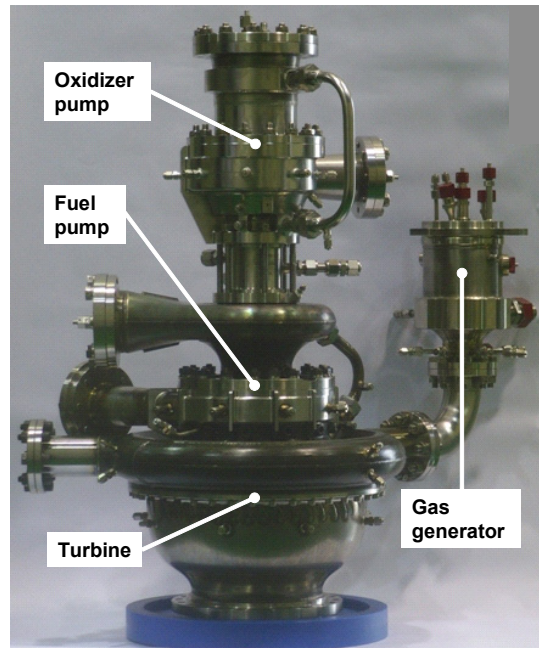


Fig. 1 Turbopump and gas generator for test

터보펌프-가스발생기 연계 시험은 엔진시스템 시험 이전에 터보펌프의 작동성을 검증하기 위하여 이루어진다[9-12]. 개발 중인 30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프-가스발생기 연계시험은 다음 세 단계를 거치며 이루어졌다. 첫째 단계는 터보펌프 성능시험으로서, 산화제펌프와 연료펌프에는 각각의 실매질인 액체산소와 케로신을 공급되고 터빈에는 고압의 상온 수소가스가 공급되어 정격 회전수에서 터보펌프가 운전된다. 둘째 단계는 터보펌프-가스발생기 개회로 시험으로서, 첫째 단계의 터보펌프 성능시험 형태에서 펌프로부터 가스발생기로 추진제를 공급한 후 연소시키며 이 시험은 가스발생기 운전의 관심을 두는 시험이다. 이 단계까지는 터보펌프의 터빈에는 고압의 상온 수소가스가 공급된다. 셋째 단계는 터보펌프-가스발생기 폐회로 연계시험으로서, 둘째 단계의 터보펌프-가스발생기 개회로 연계 시험 형태에서 가스발생기에서 연소시켜 생성된 가스를 터보펌프 터빈에 공급하여 터보펌프를 구동하는 시험이다.

이 중에서 첫째 단계의 터보펌프 성능시험[13]

은 발표된 바 있다. 이 시험을 통하여 산화제펌프, 연료펌프, IPS 등의 성능은 검증되었으나, 고온의 가스발생기 가스를 사용할 경우의 터빈 성능은 검증되지 않은 상태였다. 그리고 둘째 단계의 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험 및 셋째 단계의 터보펌프-가스발생기 폐회로 연계시험 [9, 14-16]은 발표된 바 있으나 터보펌프 자체의 성능보다는 터보펌프-가스발생기 시스템 관점에서 기술되었다.

본 논문에서는 터보펌프-가스발생기 폐회로 연계시험의 경우에 터보펌프 자체의 성능에 대하여 기술한다. 터보펌프 구성품에 엔진 실제운전 유체가 공급되고 터보펌프 시동과 종료에 엔진 실제운전 조건과 유사한 상태일 때 터보펌프 운전의 안정성과 터보펌프 성능을 점검하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 시험설비 및 시험조건

국내에는 아직 30톤급 터보펌프에 대한 실패 질시험을 수행할 용량의 시험설비가 없으며 따라서 실패질시험은 국외에서 수행되었다. 성능시험 설비의 개략도를 Fig. 2에 제시하였다. 펌프 매질로는 실패질, 즉 산화제펌프에는 액체산소를 사용하고 연료펌프에는 케로신을 사용하였고 터빈 매질로는 가스발생기에서 액체산소와 케로신이 연소되어 생성된 연료 과농 상태의 고온 가스를 사용하였다. 각 펌프 출구의 연소기 모사 오리피스 전방에서 분기되어 추진제가 가스발생기에 공급되어 연소되며 이 고온 가스는 터빈으로 공급되어 터보펌프를 작동시킨 후 후연소기에서 연소되어 대기로 배출된다. 터보펌프-가스발생기의 초기 시동을 위하여 상온의 고압 수소 가스를 사용하였으며 수소가스를 사용한 이유는 본 시험설비에서 수급이 용이했기 때문이다. 이 시동 가스는 시동 초기 약 1초 동안 터보펌프가 정격의 약 50% 회전수에서 작동할 수 있는 동력을 제공한다.

터보펌프에서 가스발생기로 연결되는 추진제 공급 라인에 각각의 유량계와 스톱 밸브가 설

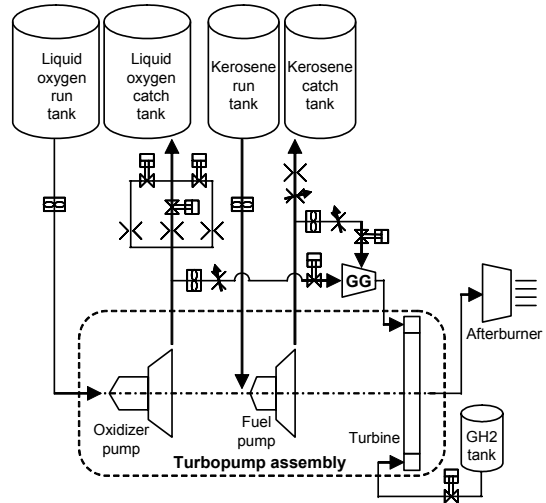


Fig. 2 Schematic of hot-fire test of turbopump

치되어 있고 두 유량계 신호를 비교하여 스톱 밸브를 조절함으로써 운전 중 가스발생기로 공급되는 액체산소와 케로신의 혼합비가 일정하도록 하였다. 가스발생기 혼합비는 터빈 입구 가스 온도가 정격값인 900K 내외가 되도록 설정하였으며 이는 주어진 연료 유량에 대하여 설정 혼합비가 유지되도록 산화제 스톱 밸브를 조절함으로써 이루어졌다. 그리고 터보펌프 회전수는 연료 스톱 밸브를 조절하여 피드백 제어되도록 하였다. 한편 산화제펌프 출구에는 오리피스 3개와 각각의 개폐밸브를 두어 3단계로 유량이 조절되도록 하였다. 연료펌프 출구에는 스톱 밸브를 두어 유량이 연속적으로 조절되도록 하였다.

산화제펌프, 연료펌프, 터빈의 입구와 출구에서 온도 및 압력을 측정한다. 그리고 산화제펌프, 연료펌프, 터빈의 상류에는 유량계를 설치하여 체적유량을 측정하며 유량계 직후에서 유체의 온도와 압력을 측정하여 질량 유량을 계산한다. 안정적인 유량 측정을 위하여 산화제펌프와 연료펌프에는 터빈 유량계 3개를 직렬로 설치하였고 터빈 상류에는 터빈 유량계 2개를 직렬로 설치하였다.

시험 후 터보펌프 상태를 Fig. 3에 제시하였다. 그림에서 터보펌프는 세로로 세워져있고 가

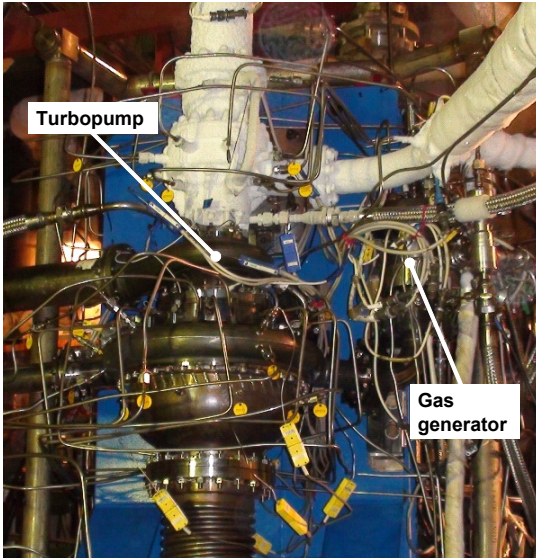


Fig. 3 Configuration of hot-fire test of turbopump

Table 1 Nominal condition (NC) of turbopump operation

| Item | Unit | Oxidizer pump | Fuel pump | Turbine |
|-------------------|------|---------------|-----------|---------|
| Flow rate | kg/s | 64.0 | 28.5 | 4.2 |
| Inlet pressure | MPa | 0.48 | 0.28 | 4.9 |
| Outlet pressure | MPa | 9.6 | 14.4 | 0.35 |
| Inlet temperature | K | 95 | 288 | 900 |
| Rotational speed | rpm | 19,410 | | |

스발생기는 우측의 터빈 입구 배관에 연결되어 있으며(Fig. 3에서 가스 발생기는 장애물이 많아서 식별이 어려움) 그리고 위쪽에 산화제펌프 입구가, 아래쪽에 터빈 출구가, 좌측에 연료펌프 입구 배관과 출구 배관이, 우측에 산화제펌프 출구 배관과 터빈 입구 배관이 연결되어 있다.

개발 중인 터보펌프의 설계 조건(NC)을 Table 1에 제시하였으며, 30톤급 엔진 개발/인증에 필요한 엔진 운용 영역과 이에 따른 터보펌프 운용점을 Table 2에 제시하였다. 터보펌프는 설계점(NC) 및 4개 탈설계점(OD1, OD2, OD3, OD4)에서 안정적으로 작동하는 것이 검증되어야 한다. 따라서 터보펌프 실매질시험에서는 모두 5개

Table 2 Operating points of engine and turbopump (normalized by NC)

| Item | NC | OD1 | OD2 | OD3 | OD4 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Engine mixture ratio | 1.00 | 0.92 | 1.08 | 1.07 | 0.92 |
| Pressure of main combustion chamber | 1.00 | 0.95 | 0.95 | 1.05 | 1.05 |
| Rotational speed of turbopump | 1.00 | 0.95 | 0.98 | 1.06 | 1.02 |
| Mass flow rate of oxidizer pump | 1.00 | 0.92 | 0.98 | 1.09 | 1.02 |
| Mass flow rate of fuel pump | 1.00 | 1.00 | 0.91 | 1.02 | 1.11 |
| Discharge pressure of oxidizer pump | 1.00 | 0.91 | 0.96 | 1.10 | 1.05 |
| Discharge pressure of fuel pump | 1.00 | 0.89 | 0.98 | 1.13 | 1.02 |

Table 3 Hot-fire tests of turbopump

| Test No. | Oxidizer pump medium | Fuel pump medium | Turbine medium | Operating point | Test duration [sec] |
|----------|----------------------|------------------|----------------------|-----------------|---------------------|
| 1 | LOX ¹⁾ | kerosene | GG ²⁾ gas | NC | 45 |
| 2 | LOX | kerosene | GG gas | NC | 120 |
| | | | | OD1 | |
| | | | | OD2 | |
| 3 | LOX | kerosene | GG gas | NC | 110 |
| | | | | OD4 | |
| | | | | OD3 | |

¹⁾liquid oxygen, ²⁾gas generator

운용점(NC, OD1, OD2, OD3, OD4)에서 운전되었다.

Table 3에 터보펌프 실매질 고온시험 내역을 제시하였다. 터보펌프 작동유체로 실매질을 사용하여 즉, 산화제펌프에 액체산소, 연료펌프에 케로신, 터빈에 가스발생기 가스를 공급하여 시험이 수행되었다. 모두 3회의 시험이 이루어졌으며 본 논문에서는 그 중에서 단일 시험 중 운용점 3개에 대하여 총 120초간 운전된 경우에 대하여 기술한다(Table 3의 Test No. 2).

Table 4 Tested operating points and rotational speed at Test No. 2

| Operating point | Time (sec) | Rotational speed (rpm) |
|-----------------|------------|------------------------|
| NC | 0~60 | 19,285 |
| OD1 | 60~90 | 18,485 |
| OD2 | 90~120 | 19,040 |

3. 성능시험 결과

모든 운용점에서 터보펌프가 안정적으로 작동되었으며 특히 터보펌프 안정성에서 중요한 터보펌프 진동 및 실(seal)의 동작이 매우 양호한 특성을 보였다.

3.1 주요 측정량

Test No. 2에서는 세 운용점(NC, OD1, OD2)에서 총 120초간 운전되었다. 시험 중 운용점 운전 시간 및 터보펌프 회전수를 Table 4에 제시하였다. 시간에 따른 터보펌프 회전수, 산화제펌프 유량, 연료펌프 유량을 Fig. 4에 제시하였으며 운용점 변경에 따라서 이 측정량들의 값이 변화하는 것이 관찰된다. 운용점이 변경되면 가스발생기 추진제 공급부 스톱 개도, 산화제펌프 출구의 개방 오리피스, 연료펌프 출구의 스톱 개도 등이 동시에 변경되기 시작한다. 산화제펌프의 경우 NC과 OD2에서는 동일하게 오리피스 2개를 개방하고 OD1에서는 오리피스를 1개만 개방한다. 연료펌프의 경우 NC→OD1에는 스톱 개도가 증가하고 OD1→OD2에는 스톱 개도가 감소한다. 운용점 변경 시점(=Time=60 sec, 90 sec 경) 터보펌프 회전수에서 관찰되는 피크는 터보펌프가 설정된 회전수에 이르도록 가스발생기 연료 스톱을 피드백 제어 하는 과정에서 발생하였으며, 이 터보펌프 회전수 피크로 인하여 펌프의 유량, 압력 등에도 피크가 관찰된다.

시간에 따른 연료펌프 출구 압력, 산화제펌프 출구 압력, 터빈 입구 압력, 터빈 입구 온도를

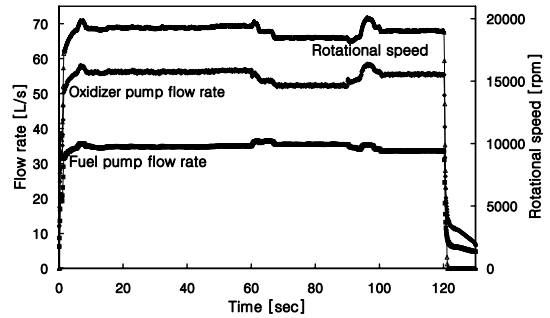


Fig. 4 Rotational speed and pump flow rate

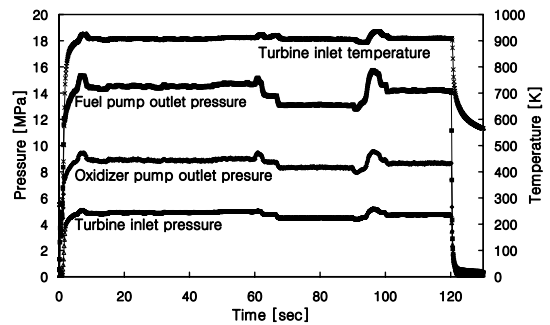


Fig. 5 Pressure at pump outlet and turbine inlet and temperature at turbine inlet

Fig. 5에 제시하였으며 운용점 변경에 따라서 이 측정량들의 값이 변화하는 것이 관찰된다. 터빈 입구 온도는 운용점 변경 구간을 제외하면 약 907K로 일정한 값을 보였으며 이는 또한 공기가 열기의 혼합비가 일정하게 유지되었음을 의미한다.

3.2 단품 성능시험과 조립체 시험의 비교

펌프 단품 성능 시험 결과와 본 시험의 터보펌프 조립체 실매질 고온시험 결과를 비교하여 펌프의 양정계수-유량계수 형태로 Fig. 6에 제시하였다. 양정계수와 유량계수는 펌프 양정과 유량의 무차원 값으로서 다음과 같이 정의된다.

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

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

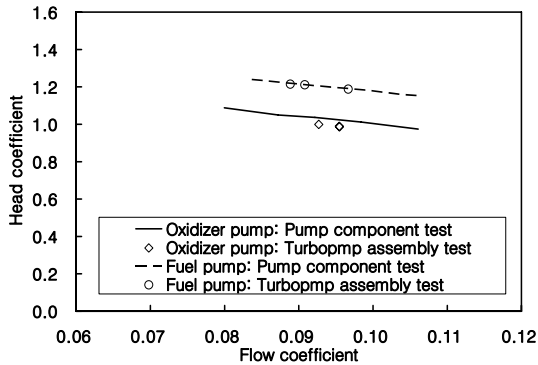


Fig. 6 Head coefficient vs. flow coefficient of pumps

여기서 Δp 는 펌프의 압력상승, ρ 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. 펌프 단품 시험은 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하였으며 시험 회전수는 약 10,000 rpm 내외로 하였다. Fig. 6에서 펌프 단품시험 결과는 선으로 표시하였고, 터보펌프 조립체 시험 결과는 기호로 표시하였으며 각 펌프에서 세 개의 운용점이 표시된다. Fig. 6을 보면 각 펌프에서 단품시험과 조립체 시험의 두 결과가 양호하게 일치하는 것을 알 수 있다. 연료펌프의 경우 동일한 유량계수에서 조립체시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 0.2~0.5% 더 작았으며 산화제펌프의 경우 조립체시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 약 3% 더 작았다. 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 실험 고온시험 결과를 터빈의 효율-속도비 형태로 Fig. 7에 제시하였다. 터빈 단품 시험은 상온의 공기를 매질로 하고 수력동력계로 터빈에서 생성되는 동력을 측정하며 시험 회전수를 약 12,000 rpm 이하로 하였다. 터빈 단품 시험을 통하여 터빈의 속도비와 압력비의 함수

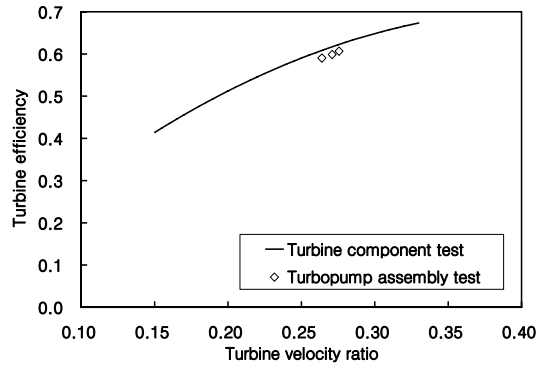


Fig. 7 Efficiency vs. velocity ratio of turbine

로 터빈 효율을 얻을 수 있다. 이 터빈 효율을 Fig. 7에 선으로 표시하였으며 이 때 터빈 압력비는 본 조립체 시험 결과를 사용하였다. 한편 본 시험의 조립체 시험에서 펌프에 소요되는 동력을 본 시험의 터빈 단일 동력으로 나누어 얻은 값이 Fig. 7에 기호 세 개로 표시된 조립체 시험의 터빈 효율이다. Fig. 7을 보면 터빈의 조립체 시험 효율이 단품 시험 효율에 비하여 상대적으로 2.5~3% 낮았다.

터보펌프 성능 관점에서 요약하면, 본 조립체 시험 결과와 펌프 및 터빈의 단품 성능시험 결과를 비교할 때 펌프의 경우 양정계수 차이가 최대 3%, 터빈의 경우 터빈 효율 차이가 상대적으로 최대 3%로 나타났으며 이로부터 두 시험결과가 성능특성 관점에서 잘 일치한다고 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

개발 중인 터보펌프 조립체에 대하여 산화제 펌프에는 액체산소, 연료펌프에는 케로신, 터빈에는 고온의 가스발생기 가스를 사용한 실험이 이루어졌다.

터보펌프는 설계점과 탈설계점의 전 영역에서 안정적으로 작동하였고 요구되는 성능 조건을 만족시켰다. 본 논문에서 소개된 시험에서는 1회의 운전에서 운용점을 3가지로 변경하며 터보펌프가

120초간 운전되었다. 터보펌프 조립체의 실매질 시험 결과와 기존에 상사매질에서 수행되었던 펌프와 터빈의 단품성능시험 결과를 비교할 때, 펌프의 경우 양정계수가 최대 3%의 차이가 있었고 터빈 효율의 경우 상대적으로 최대 3%의 차이가 있었으며 이 결과는 상사매질 시험 결과와 실매질 시험 결과가 성능특성 관점에서 잘 일치한다고 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 제25회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2005, pp.375-383
2. 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., 2007, AIAA 2007-5516
3. 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
4. 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, "로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험," 제4회 한국유체공학학술대회 논문집, 2006, pp.523-526
5. 홍순삼, 김대진, 김진선, 최창호, 김진한, "터보펌프의 수력 성능시험," 한국추진공학회지, 제10권, 제1호, 2006, pp.18-22
6. 정은환, 김진한, "충동형 터빈에 대한 시험적 고찰," 유체기계저널, 제8권, 제6호, 2005, pp. 26-32
7. 정은환, 박편구, 김진한, "초음속 충동형 축류터빈의 부분분사비 효과에 대한 실험적 연구," 한국추진공학회지, 제11권, 제4호, 2007, pp.59-66
8. 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한, "액체로켓용 터보펌프의 고온 성능시험," 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007, pp.56-60
9. 김승한, 남창호, 김철웅, 문윤완, 설우석, "터보펌프+가스발생기 폐회로 연계시험," 제31회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2008, pp.192-132
10. Rahman, S. A. and Hebert, B. J., "Large Liquid Rocket Testing - Strategies and Challenges," Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, 2005, AIAA 2005-3564
11. Souchier, A., Beaurain, A., Lassourdiere, F., "MS100 Powerpack Demonstrator Status," Proceedings of the 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Huntsville, Alabama, 2000, AIAA 2000-3158
12. Gribben, E., Driscoll, R., Marvin, M., Wiley, S., Anderson, L., Fischer, T., "Design and Test Results on Agena 2000 A High Performance Turbopump Fed 15,000 Lbf Thrust Storable Bipropellant Rocket Engine," Proceedings of the 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cleveland, Ohio 1998, AIAA 98-3362
13. 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 실매질시험," 제31회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2008, pp.359-365
14. 서성현, 안규복, 한영민, 최환석, "터보펌프 연계상태의 가스발생기 연소 특성," 제31회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2008, pp.133-136
15. 문윤완, 김승한, 설우석, "터보펌프 조립체-가스발생기 연계 개회로 시험에서의 시동특성 분석," 제31회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2008, pp.15-18
16. 문윤완, 김승한, 설우석, "터보펌프 조립체-가스발생기 연계 폐회로 시험에서의 시동특성 분석," 제31회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2008, pp.19-22