

75톤급 로켓엔진용 터보펌프의 실회전수 상사매질 시험

홍순삼* · 김대진* · 김진한*

Model-Fluid Full-Speed Test of a Turbopump for a 75 Ton Class Rocket Engine

Hong Soonsam* · Kim Daejin* · Kim Jinhan*

ABSTRACT

A turbopump for a 75 ton class liquid rocket engine was tested at full speed for 20 seconds using model fluid. Liquid nitrogen is used for the oxidizer pump, water for the fuel pump, and hot gas for the turbine. The non-cavitating head of pump from the turbopump assembly test showed a good agreement with that from the pump component test. The relative difference of turbine efficiency between the turbopump assembly test and the turbine component test was 0.3% only. Suction performance from the turbopump assembly test was higher than that of pump component test, which resulted from the thermodynamic effect of cavitation.

Key Words: Turbopump, Liquid Rocket Engine, Oxidizer Pump, Fuel Pump, Turbine, Cavitation

1. 서 론

액체로켓엔진에서 터보펌프는 추진제 탱크로부터 공급되는 저압의 추진제를 가압하여 연소실로 공급하는 역할을 한다. 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 액체산소와 케로신을 추진제로 하는 가스발생기 사이클의 추력 75톤급 엔진에 사용되는 터보펌프[1]를 개발 중이다. 75톤급 터보펌프 개발은 기존에 항우연에서 개발한 30톤급 터보펌프 경험[2, 3]을 바탕으로 하고 있다. 이 터보펌프는 산화제펌프, 연료펌

프, 터빈이 동일 축에 위치하고 있으며 하나의 터빈이 두 펌프를 구동하는 형식을 취하고 있다. 두 펌프는 모두 단단 원심형이고 터빈은 단단 충동형이다. 본 시험에 사용된 터보펌프가 Fig. 1에 제시되어 있다.

제작된 터보펌프에 대한 상사매질 성능시험은 먼저 각 구성품에 대하여 수행된 후 조립체를 대상으로 이루어졌는데, 이 시험들은 항우연 내의 시험설비를 이용하여 수행되었다. 펌프 단품 상사 성능시험에서는 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하며 이 시험을 통하여 펌프의 양정-유량 특성, 효율-유량 특성, 캐비테이션 특성, 그리고 축추력 특성이 얻어진다

† 2013년 11월 13일 접수 ~ 2013년 11월 29일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: sshong@kari.re.kr

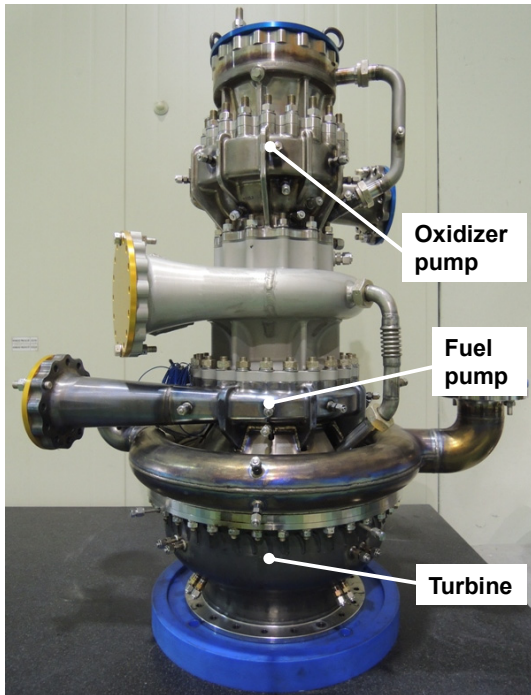


Fig. 1 Turbopump assembly for test

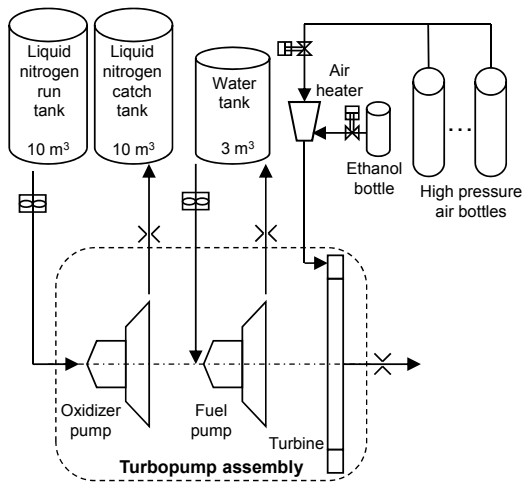


Fig. 2 Schematic of turbopump assembly test

[4]. 한편, 터빈 단품 상사 성능시험에서는 상온의 공기를 매질로 하고 터빈 동력은 수력동력계로 측정되며, 이 시험을 통하여 터빈 효율 곡선이 보정회전수와 압력비의 함수로 얻어진다

[5].

터보펌프 조립체 시험에서는 산화제펌프-연료펌프-터빈 조립체의 동력균형이 점검되며, 또한 실(seal) 및 베어링의 작동과 터보펌프의 진동 특성이 점검된다. 본 연구에서는 개발 중인 추력 75톤급 터보펌프 조립체에 대하여 수행된 상사매질 성능시험에 대하여 고찰한다. 75톤급 터보펌프의 초기 모델에 대한 터보펌프 조립체 시험결과는 이미 검토된 바 있고[6], 본 연구에서는 초기 모델을 바탕으로 하여 신규 제작된 개량된 모델의 터보펌프 시험결과를 제시한다.

2. 시험설비 및 시험조건

본 연구에는 시험의 용이성과 안전성을 감안하여 터보펌프 조립체 시험에 실제 매질 (산화제펌프에 액체산소, 연료펌프에 케로신, 터빈에 고온의 가스발생기 가스) 대신 상사매질 (산화제펌프에 액체질소, 연료펌프에 물, 터빈에 고온 공기)을 사용하였다.

터보펌프 조립체 시험 설비의 구성도를 Fig. 2에 제시하였다. 산화제펌프에는 10 m³ 용량의 액체질소 탱크 2개를 두고 공급탱크에서는 펌프로 액체질소를 공급하고 회수탱크에서는 펌프에서 배출되는 액체질소를 받는다. 연료펌프에는 3 m³ 용량의 물탱크 1개를 두어 운전 중 연료펌프가 물탱크로부터 물을 흡입하여 다시 이 물탱크로 물을 배출한다. 펌프 출구 배관에 오리피스를 설치하여 운전 중 펌프 유량계수가 고정되도록 하였다.

터빈을 구동하는 고온/고압의 가스는 공기가 열기에서 고압공기에 에탄올을 연소시켜 생성된다. 터빈 출구 배관에는 오리피스를 설치하여 운전 중 원하는 터빈 압력비를 얻을 수 있도록 하였다.

터보펌프 조립체 시험 장면을 Fig. 3에 제시하였다. 터보펌프는 지면에 수직으로 세워진 상태에서 운전된다. 그림에서 위쪽이 산화제펌프 입구방향이고 아래쪽이 터빈 출구 방향이다.

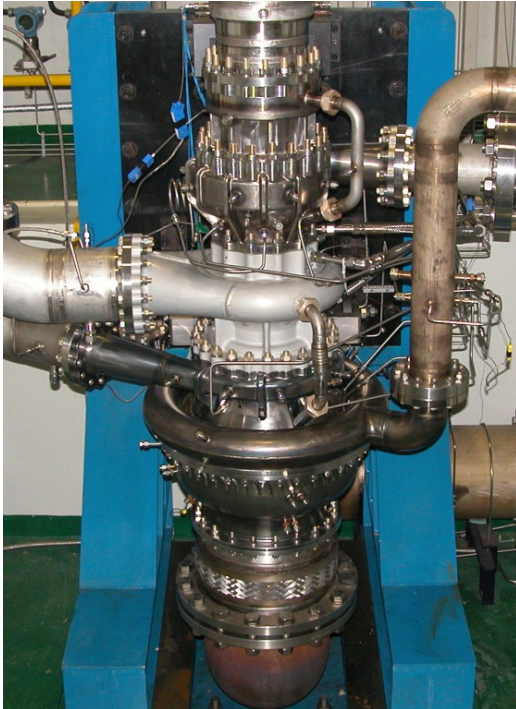


Fig. 3 Configuration of turbopump assembly test

유동시험에서 상사시험 조건은 일반적으로 기하학적 상사조건과 동력학적 상사조건으로 구성되는데, 여기서는 터보펌프 실매질 시험과 상사매질 시험의 상사성을 검토하였다. 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[7], 본 시험의 경우 정격회전수에서 펌프와 터빈의 레이놀즈수가 10^7 이상이므로 레이놀즈수의 영향은 크지 않을 것으로 보인다. 터빈의 경우 로터 입구 마하수를 맞추어준다. 또한 펌프와 터빈에서 공통적으로 회전체 입구의 유동각(혹은 속도삼각형)을 실제 시험과 맞춘다. 이상에서 살펴본 것처럼 본 시험의 경우 상사매질을 사용하고 있지만 기하학적 상사조건 및 동력학적 상사조건을 만족시키

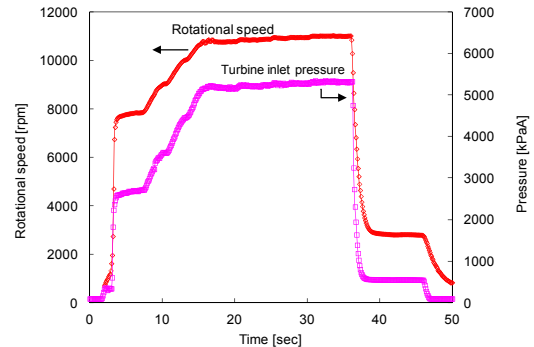


Fig. 4 Rotational speed and turbine inlet pressure

고 있으므로 그 시험결과가 실매질을 사용하는 경우와 유사할 것으로 예측된다. 실제로 추력 30톤급 터보펌프의 경우에 상사매질 시험과 실매질 시험의 결과가 서로 유사한 것을 확인할 수 있었다[3].

3. 성능시험 결과

시험 중 터보펌프는 안정적으로 작동되었으며, 운전의 안정성에서 중요한 진동특성 및 실(seal)의 동작이 양호한 특성을 보였다. 그리고 시험 후 터보펌프를 분해하여 검사한 결과 부품 상태가 양호하였다. 이후 제시되는 성능시험 결과에서는 먼저 시간에 따른 성능 파라미터의 변화를 다룬 후 터보펌프 부품 성능시험과 조립체 성능시험의 비교를 다룬다.

3.1 시간에 따른 터보펌프 성능 파라미터의 변화

시험 중 시간에 따른 터보펌프 회전수와 터빈 입구 압력을 Fig. 4에 제시하였다. 터보펌프 회전수는 단계적으로 상승하여 후반 20초 동안(Time = 16-36sec) 비교적 일정하게 유지된다. 시험이 Time = 36sec경에 종료된 것은 산화제펌프 매질인 액체질소의 공급탱크와 회수탱크 용량의 한계 때문이다. 회전수가 Time = 16sec까지 단계적으로 상승하고 있는데, 이는 공기가열기의 작동 특성으로 인한 것이다. 이 공기가열

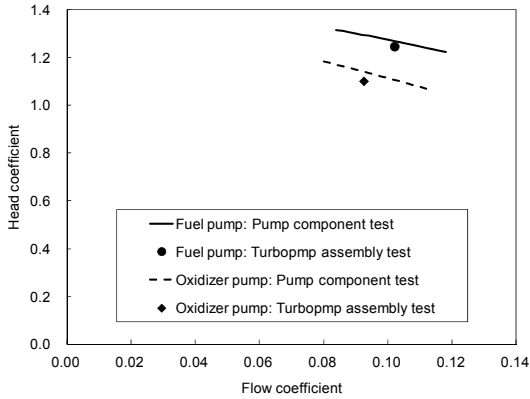


Fig. 5 Head coefficient vs. flow coefficient of pumps

기는 점화 후 단계별로 연소압력이 증가하며 Time = 16sec경 연소 압력이 정격 조건에 도달되고 이후 이 압력은 일정하게 유지된다. 회전수는 Time = 16sec 경 10700 rpm에 이르고 이후 조금씩 계속 증가하여 Time = 36sec경 11000 rpm이 된다. 이 회전수는 정격 회전수 11000 rpm의 97~100% 해당된다. 공기가열기 출구에서 터빈 입구까지의 배관의 길이가 길어서 이 배관 온도가 정상상태에 이르기까지 시간이 소요되고 그 시간 동안 터빈 입구 압력도 조금씩 증가하며 따라서 터보펌프 회전수도 조금씩 증가한다.

3.2 터보펌프 단품 시험과 조립체 시험의 비교

펌프 단품 시험의 펌프 성능과 본 시험의 터보펌프 조립체 시험의 성능을 비교하여 양정계수-유량계수의 형태로 Fig. 5에 나타내었다. 양정계수와 유량계수의 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 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 사

이의 유로 면적, u_{1t} 는 인듀서 입구에서 팁 속도이다.

성능 비교를 위한 터보펌프 조립체시험 결과는 시험 후반부의 정속구간 중에서 Time = 30~35 sec 구간의 값을 평균하여 얻었다. 펌프 단품 성능시험은 서론에 소개된 대로 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하였으며, 시험 회전수는 정격 회전수의 50% 내외로 하였다. Fig. 5에서 터보펌프 조립체 시험 결과는 기호로 표시하였는데, 각 펌프에서 1개의 운용점으로 표시된다. Fig. 5를 보면 각 펌프에서 단품 시험과 조립체 시험의 두 결과가 양호하게 일치하는 것을 알 수 있다. 연료펌프의 경우 동일한 유량계수에서 조립체시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 1.8% 더 작았다. 산화제펌프의 경우 조립체시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 약 3.5% 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. 참고로 동점성계수가 물에 비하여 액체질소가 약 5배 작다.

터빈 단품 시험의 터빈 성능과 본 시험의 터빈 성능을 비교하여 터빈의 효율-보정회전수 형태로 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 터빈 효율은 정격의 값으로 나누어 표시하였다. 터빈 단품 시험은 서론에 소개된 대로 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. 6에 곡선으로 표시하였다. 터빈의 보정회전수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 N 은 터빈 회전수이고 T_{00} 은 터빈 입구 전온도이다. 본 시험에서 각각의 펌프에 소요되

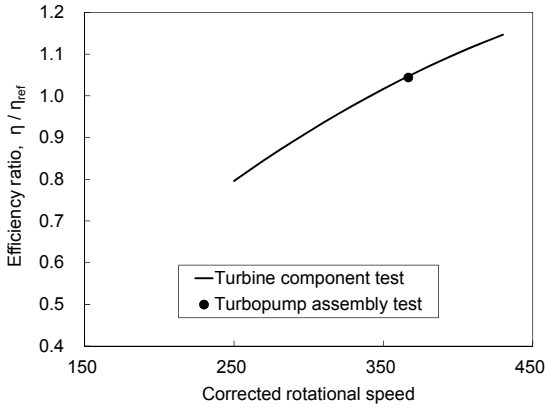


Fig. 6 Efficiency vs. corrected rotational speed of turbine

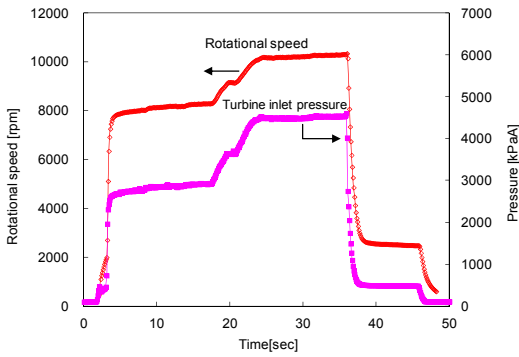


Fig. 7 Rotational speed and turbine inlet pressure for cavitation test of oxidizer pump

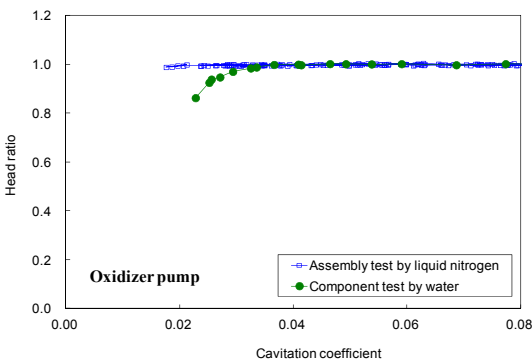


Fig. 8 Head ratio vs. cavitation coefficient of oxidizer pump

는 동력(펌프 유량과 압력 상승의 곱을 펌프 효율로 나눈 값)을 합한 후 이를 터빈 단열 동력으로 나누어 얻은 값이 그림에 기호로 표시된 조립체 시험의 터빈 효율이다. 그림을 보면 터빈의 조립체 시험 효율과 단품 시험 효율의 상대적 차이는 0.3%에 불과하다. 두 효율의 차이가 매우 작다는 것으로부터 펌프 단품 성능시험, 터빈 단품 성능시험, 터보펌프 조립체 성능시험이 신뢰성 있게 수행되었다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

3.3 산화제펌프의 흡입성능 시험

산화제펌프의 흡입성능시험은 통상 펌프 단품 시험 중에 이루어지는데, 매질은 물을 사용하고 펌프는 전기모터를 사용하여 구동하며 터보펌프 조립체에서 산화제펌프만 분리하여 별도로 시험하게 된다. 본 연구에서는 터보펌프 조립체 형태로 액체질소를 매질로 하여 산화제펌프에 대하여 흡입성능 시험을 수행하였다. 펌프 흡입성능 시험은 펌프를 구동한 후 펌프 입구 압력을 감소시키면서 (이를 위하여 펌프 매질 저장 탱크의 압력을 감소시킴) 펌프 성능을 측정하는 과정으로 진행된다. 시험 중의 터보펌프 회전수와 터빈 입구 압력 변화를 Fig. 7에 제시하였는데, 성능시험 결과인 Fig. 4와 비교할 때 정상상태의 운전 시간이 약 11초 (Time = 24-35sec)로서 더 짧고 회전수가 조금 더 낮다. 시험 후 반부인 Time = 35sec에 회전수는 10300 rpm 이었다.

Fig. 8에는 터보펌프 조립체 형태로 시험된 경우 (매질은 액체질소이고 회전수는 10300 rpm)와 펌프 단품 형태로 시험된 경우(매질은 물이고 회전수는 5500 rpm)의 산화제펌프 흡입성능 시험 결과를 비교하였다. 이 그림에서 양정비는 측정된 양정과 캐비테이션이 발생하지 않을 때의 양정의 비이다. 캐비테이션계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Cavitation coefficient } \sigma = (p_{00} - p_v) / (0.5 \rho v_{1t}^2) \quad (4)$$

여기서 p_{00} 은 펌프 입구의 전압력이고 p_v 는 유체의 포화 증기압력이다. 단품시험의 경우 캐비테이션 계수가 0.03에 이르면 양정비가 0.97까지 감소하는 반면, 조립체시험의 경우 캐비테이션 계수가 0.02에 이르러도 양정비는 여전히 정상상태를 보인다. 즉 터보펌프 조립체 시험의 경우가 펌프 단품 시험의 경우에 비하여 흡입성능이 우수함(더 낮은 캐비테이션 계수에서도 성능저하 없이 작동함)을 알 수 있다. 두 시험 결과의 차이는 펌프 작동매질의 차이에서 발생하는 것으로서 이를 캐비테이션의 열역학적 효과라고 부르며 기존 시험에서도 이 효과가 관찰된 바 있다[8, 9]. 이 효과를 부연 설명하면 다음과 같다: 캐비테이션이 진행되면서 펌프 인두서 입구 날개 부근에서 액체가 증발하여 기포가 생성되는데 이 증발 과정에서 열을 빼앗아 가기 때문에 주위 액체 온도가 저하되고 따라서 포화 증기압도 감소하게 되어, 캐비테이션이 억제되는 효과가 있게 되며 이를 캐비테이션의 열역학적 효과라고 한다.

4. 결 론

개발 중인 추력 75톤급 터보펌프에 대하여 상사매질을 사용하여 정격 회전수에서 약 20초간 성능시험이 수행되었다. 시험 중 터보펌프가 안정적으로 운전되었고 시험 후 시험시체를 분해하여 검사한 결과 부품 상태가 정상이었다.

터보펌프 조립체 시험 결과와 펌프 및 터빈 단품 시험 결과를 비교하였는데, 연료펌프 양정의 경우 1.8% 차이가 있었고 산화제펌프 양정의 경우 3.5%의 차이가 있었으며 터빈 효율의 경우 그 상대적 차이가 0.3%에 불과하였다.

산화제펌프에 대하여 흡입성능 시험 결과를 비교한 결과, 액체질소를 매질로 하는 터보펌프 조립체 시험의 경우가 물을 매질로 하는 펌프 단품 시험의 경우에 비하여 흡입성능이 더 우수

한 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김진한, 최창호, 정은환, 전성민, 홍순삼, “한국형발사체용 터보펌프 개발 현황”, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 2012.
- [2] 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, “30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발 현황”, 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2005, pp. 375-383.
- [3] Hong Soonsam, Kim Daejin, Kim Jinsun, Kim Jinhan, "Hot-Fire Test of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine", 61st International Astronautical Congress, IAC-10-C4.1.10, 2010.
- [4] 김대진, 홍순삼, 최창호, 노준구, 김진한, “75톤급 로켓엔진용 연료펌프의 수력성능시험”, 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2009, pp.78-81.
- [5] 정은환, 이항기, 박편구, 광현덕, 김진한, “75톤급 액체로켓 엔진 터보펌프 터빈의 성능특성연구”, 한국추진공학회지, 제 14권, 제5호, 2010, pp.65-71.
- [6] 홍순삼, 김진선, 김대진, 김진한, “75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 조립체의 상사매질 성능시험”, 한국추진공학회지, 제 15권, 제 2호, 2011, pp. 56-61.
- [7] Balje, O. E., Turbomachines, John Wiley & Sons Inc., 1981.
- [8] 홍순삼, 김진선, 김진한, “터보펌프 인두서에 대한 극저온 성능시험”, 한국추진공학회지, 제 11권, 제 1호, 2007, pp. 64-70.
- [9] 김진선, 홍순삼, 김대진, 최창호, 김진한, “액체질소를 이용한 산화제펌프의 극저온 성능시험”, 대한기계학회논문집 B권, 제34권, 제4호, 2010, pp. 391-397.