

技術論文

액체로켓엔진용 산화제펌프에 대한 액체산소 성능시험

홍순삼*, 김대진*, 김진선*, 김진한*

Liquid Oxygen Test of Oxidizer Pump of a Liquid Rocket Engine

Soon-Sam Hong*, Dae-Jin Kim*, Jin-Sun Kim* and Jinhan Kim*

ABSTRACT

An oxidizer pump of a turbopump for a 30-ton class gas generator cycle engine was tested in the medium of liquid oxygen. The turbine was driven by cold hydrogen gas in the test. The oxidizer pump was operated stably at both design and off-design conditions, satisfying the performance requirements. The pump head coefficient from the liquid oxygen test was 2~3% lower than that from the water test. The power required to run the oxidizer pump was well balanced with the power produced by the turbine.

초 록

가스발생기 사이클의 추력 30톤급 엔진에 적용 가능한 터보펌프의 구성품인 산화제펌프에 대하여 실제 작동 유체인 액체산소를 이용한 시험이 이루어졌다. 본 시험에서 터빈은 상온 수소 가스로 구동되었다. 산화제펌프는 설계점 및 탈설계점에서 안정적으로 작동되었고 성능 요구조건을 만족시켰다. 액체산소를 매질로 하는 경우의 산화제펌프 양정계수는 물을 매질로 하는 경우에 비하여 약 2~3% 더 낮은 값을 보였다. 산화제펌프 구동에 필요한 동력과 터빈에서 생성되는 동력이 서로 잘 일치하였다.

Key Words : Turbopump(터보펌프), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Oxidizer Pump(산화제펌프), Liquid Oxygen Test(액체산소 시험), Fuel Pump(연료펌프), Turbine(터빈)

1. 서 론

터보펌프는 액체로켓엔진에서 추진제를 가압하여 연소실로 공급하는 역할을 한다. 현재 한국항공우주연구원(이하 항공우연)에서는 액체산소와 케로신을 추진제로 하는 가스 발생기 사이클의 30톤급 액체로켓엔진에 적용 가능한 터보펌프를 개발하고 있다[1-3]. 이 터보펌프는 단단 원심형의 산화제펌프와 연료펌프, 그리고 단단 충동형

의 터빈으로 구성되어 있으며 한 개의 터빈이 동일 축 선상에 있는 두 개의 펌프를 구동하는 형식이다(Fig. 1 참조). 두 펌프 사이에는 IPS(Inter-propellant seal)를 두고 기체헬륨으로 퍼지하여 산화제와 연료가 접촉되지 않도록 한다.

본 연구에서는 개발 중인 추력 30톤용 터보펌프 구성품 중에서 산화제펌프(Table 1의 규격 참조)에 대한 실패질시험, 즉 액체산소를 이용한 시험에 대하여 기술한다. 본 시험의 목적은 실패질에서 산화제펌프가 안정적으로 작동하는지를 확인하는 것이다.

펌프를 액체산소에서 시험할 경우에는 폭발에 특히 유의하여야 한다. 펌프는 고속으로 회전하기 때문에 금속과 금속이 마찰될 소지가 항상 존

† 2009년 3월 31일 접수 ~ 2009년 7월 21일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원

교신저자, E-mail : sshong@kari.re.kr

대전시 유성구 과학로 115

Table 1. Nominal condition of oxidizer pump operation

Item	Unit	Value
Propellant	Liquid oxygen	
Mass flow rate	kg/s	64.0
Inlet total pressure	MPaA	0.48
Outlet total pressure	MPaA	9.62
Inlet total temperature	K	95
Rotational speed	rpm	19,410

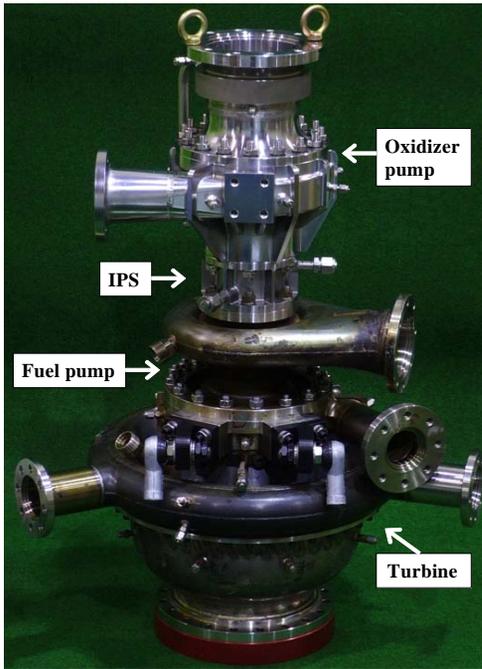


Fig. 1. Turbopump assembly for test

재하며 액체산소 환경에서 이러한 마찰이 있을 경우 폭발이 일어날 수 있다. 따라서 액체산소 펌프의 단품 성능시험이나 예비시험 과정에서는 이 위험성을 고려하여 펌프 시험용 매질을 물이나 액체질소를 사용하는 경우가 많다.

본 시험에 사용된 터보펌프에는 산화제펌프와 터빈은 정상적으로 조립된 반면에 연료펌프는 인듀서와 임펠러를 제거한 상태로 조립되었다. 연료펌프의 인듀서와 임펠러를 제거한 채로 시험한 이유는 첫째, 연료펌프 구동에 소요되는 동력이 없게 되므로 적은 동력으로도 산화제펌프 운전이 가능하며, 실제로 항우연에서 본 연구의 시험에 사용된 터보펌프에 대해 상온 공기를 터빈에 공급하여 산화제펌프를 액체질소를 매질로 해서 설계회전수에서 시험을 수행할 수 있었다. 둘째, 연

료펌프의 오작동으로 인한 사고 위험을 감소시킬 수 있다는 것이다.

개발 중인 30톤급용 터보펌프에서 산화제펌프와 연료펌프의 후방 베어링은 각각의 펌프 매질로 생각되며 이 매질은 각각의 펌프 내부에서 순환되도록 설계되었다. 후방 베어링의 냉각과정을 살펴보면, 펌프 매질은 압력이 높은 임펠러 출구로부터 후방 베어링을 통과하며 베어링을 냉각한 후 바이패스관을 통하여 압력이 낮은 펌프 입구로 유입된다. 하지만 본 시험에 사용된 연료펌프의 경우 임펠러가 없기 때문에 연료펌프의 후방 베어링의 냉각을 위한 매질의 흐름이 없게 된다. 이 베어링 냉각 문제를 해결하기 위하여 연료펌프의 바이패스관 후단을 연료펌프 입구에 연결하지 않고 별도의 배관을 통하여 연료 회수탱크로 연결하였다. 그래서 연료 공급탱크를 가압하면 연료가 연료펌프 케이싱 및 후방베어링을 통하여 회수탱크로 배출되도록 하였다.

시험에 사용된 터보펌프의 모든 구성품에 대하여 먼저 항우연에서 상사매질을 사용하여 성능시험이 이루어졌다. 산화제펌프의 경우, 전기모터로 구동되고 물을 매질로 하여 설계 회전수의 약 50% 조건에서 수력 성능시험[4] 및 축추력 측정 시험[5]이 수행되었다. 또한 연료펌프의 인듀서와 임펠러를 제거한 채로 터보펌프 조립체를 구성하여 산화제펌프에는 극저온 유체인 액체질소를, 연료펌프 케이싱에는 물을, 터빈에서 상온의 공기를 공급하여 정격회전수에서 성능시험이 이루어졌다. 이 터보펌프 조립체 시험실에서는 산화제펌프에 물 또는 액체질소를, 연료펌프에는 물을, 터빈에는 상온 공기 또는 고온 공기를 공급하여 터보펌프 조립체 시험을 할 수 있다[6-8]. 한편, 본 시험에 사용된 터빈도 항우연에서 상사매질인 상온의 공기를 사용하여 성능시험이 이루어졌다[9].

본 산화제펌프의 액체산소 성능시험이 국외에서 성공적으로 이루어진 후 계속하여 이 시험실 비에서 정상적인 연료펌프를 조립하여 구성된 터보펌프 조립체에 대하여 액체산소/케로신/수소 가스를 매질로 하여 터보펌프 조립체 성능시험이 성공적으로 이루어졌다[10]. 또한 이어서 터보펌프-가스발생기 폐회로 연계시험(터보펌프로부터 공급받은 추진제를 가스발생기에서 연소시키고 이 연소가스로 터보펌프를 구동하는 형식) 성공적으로 이루어졌다[11].

II. 성능시험 설비 및 성능시험 조건

국내에는 아직 30톤급 터보펌프에 대한 실패 질시험을 수행할 용량의 시험설비가 없으며 따라

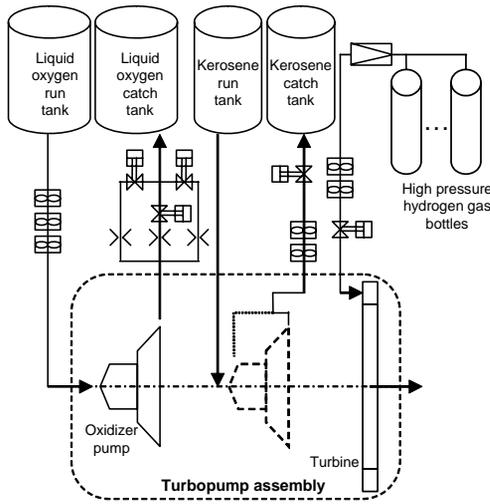


Fig. 2. Schematic of liquid oxygen test of oxidizer pump

서 본 시험은 국외에서 수행되었다. 성능시험 설비의 개략도를 Fig. 2에 제시하였다. 펌프 매질로는 실매질, 즉 산화제펌프에는 액체산소를 사용하고 연료펌프 케이싱에는 케로신을 공급하였다. 터빈 매질로는 상온의 수소가스를 사용하였다. 질소나 공기를 사용하지 않고 수소가스를 사용하여 터빈을 구동한 것은 수소의 가스상수가 질소나 공기에 비하여 훨씬 크기 때문에 고온이 아닌 상온 가스 상태로도 설계 터빈 입구 압력 이하에서 터보펌프를 설계 회전수로 구동할 수 있기 때문이다. 수소가스 구동으로 터보펌프를 시험하는 경우는 액체산소/액체수소를 추진제로 하는 터보펌프에서 자주 사용되었다[12,13].

본 시험의 관심 대상은 산화제펌프이다. 따라서 연료펌프에는 인듀서와 임펠러를 조립하지 않았으며 연료펌프 후방 베어링 냉각을 위하여 연료를 바이패스관을 통하여 터보펌프 외부로 배출시켰다. 연료 공급 탱크는 약 0.9 MPaA로 가압하였고 바이패스관을 통하여 배출되는 연료는 회수탱크로 보내어졌다.

산화제펌프의 경우 공급탱크로부터 유입된 액체산소는 펌프에서 가압된 후 오리피스를 통과하여 회수탱크로 배출된다. 터빈의 경우 고압 탱크에 저장된 수소가스는 터빈을 구동한 후 터빈 하류 배관을 통하여 외기로 배출되며 안전을 위하여 이 배출 수소가스는 후연소기에서 연소된다. 산화제펌프 주배관의 밸브를 개방한 상태에서 터빈 구동용 고압 수소 가스의 공급 밸브를 개방/폐쇄함으로써 터보펌프가 작동/정지된다.

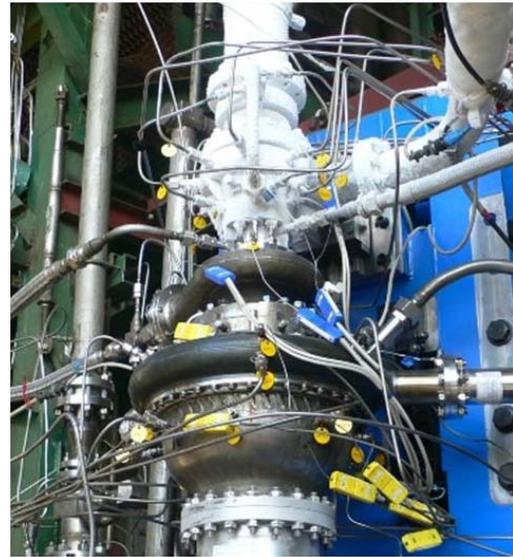


Fig. 3. Photograph of turbopump after liquid oxygen test

산화제펌프 출구에는 오리피스 3개와 각각의 개폐밸브를 두어 3단계로 유량이 조절되도록 하였다. 오리피스 2개를 열면 설계 유량계수가 얻어지고 여기서 1개를 닫거나 1개를 추가로 열면 저유량 혹은 고유량 조건이 얻어진다. 터빈 상류에는 압력 레귤레이터를 설치하여 터빈 입구 압력이 조절된다.

터보펌프 성능 관련 측정량으로는 온도, 압력, 유량, 회전수 등이 있다. 산화제펌프, 연료펌프, 터빈의 입구와 출구에서 온도 및 압력을 측정한다. 그리고 산화제펌프 상류, 연료펌프 바이패스관 후방, 터빈의 상류에는 터빈식 유량계를 설치하여 체적유량을 측정하며 유량계 직후에서 유체의 온도와 압력을 측정하여 질량 유량을 계산한다. 유량의 경우 안정적인 측정을 위하여 터빈식 유량계 2~3개를 직렬로 설치하여 사용하였다.

시험 후 터보펌프 상태를 Fig. 3에 제시하였는데 산화제펌프 외부에는 성애가 관찰된다. 산화제펌프는 지면에 수직으로 세워져있으며 Fig. 3에서 위쪽에 산화제펌프 입구배관이, 아래쪽에 터빈 출구 배관이, 좌측에 연료펌프 입구배관이, 우측에 산화제펌프 출구배관, 터빈 입구배관, 연료펌프 바이패스관의 배출구가 연결되어있다.

III. 성능시험 결과

여러 조건으로 국외에서 수행된 실시된 산화제펌프 시험의 시험조건 및 시험결과를 요약하여

Table 2. Oxidizer pump test summary

Test No.	Oxidizer pump medium	Turbine medium	Working point	Test duration [sec]	Rotational speed [rpm]
1	LN2 ¹⁾	GH2 ³⁾		50	17,450
2	LN2	GH2	NC ⁴⁾	50	19,030
3	LOX ²⁾	GH2		30	15,280
4	LN2	GH2	NC, OD ⁵⁾	106	18,670~22,370
5	LOX	GH2	NC	30	20,610
6	LOX	GH2	NC, OD	120	18,140~21,210

¹⁾Liquid nitrogen, ²⁾Liquid oxygen, ³⁾Gas hydrogen, ⁴⁾Nominal condition, ⁵⁾Off-design condition

Table 2에 제시하였다. 30톤급 엔진의 개발 및 인증에 필요한 엔진 운용 조건에 맞추어 터보펌프 운용 조건이 결정되며 이렇게 도출된 운전조건이 정격 운전조건(NC) 및 탈설계 운전조건(OD)이다. 안정적인 시험을 위하여, 산화제펌프를 액체산소에서 운전하기 전에 액체질소를 매질로 하여 먼저 예비 시험을 하였다(Test No. 1, 2, 4). 액체질소는 액체산소와 같은 극저온 유체이고 물성도 서로 유사하지만 액체산소와 달리 급속 마찰로 인한 폭발의 위험성이 없기 때문에 액체산소 펌프의 상사시험 매질로 많이 활용된다.

시험 결과 모든 운용점에서 산화제펌프가 안정적으로 작동하였으며 특히 산화제펌프 안정성에서 중요한 실(seal) 및 베어링의 작동이 양호한 특성을 보였다.

3.1 주요 측정량

Table 2의 Test No. 6에서 시험 중 운용점 변경순서 및 몇 가지 측정량에 대한 시험결과의 평균값을 Table 3에 제시하였다. 시험 중 운용점이 변경되면 터빈 구동용 수소압력, 산화제펌프 출구의 개방 오리피스가 변경된다. 터빈 구동용 수

Table 3. Test result summary of Test No. 6

Test div.	Working point	Time [sec]	GH2 pressure [MPaA]	Rotational speed [rpm]	Oxidizer Pump flow ratio	No. of open orifice
6(1)	OD	0~15	1.81	18,140	1.027	3
6(2)	OD	16~31		18,400	0.969	1
6(3)	OD	31~46	2.10	19,910	0.964	1
6(4)	NC	46~100		19,800	0.994	2
6(5)	OD	105~120	2.40	21,210	1.014	3

소 압력은 3단계로 변화시켰으며 시험 후반으로 가면서 그 값이 증가되도록 하였다. 시험구간이 6(1)에서 6(2)로 변경될 경우에는 산화제펌프 출구 오리피스 2개가 동시에 닫히게 되는데, 펌프에 미치는 충격을 완화시키기 위하여 Time=15sec에 먼저 오리피스 1개를 닫고 1초 후인 Time=16sec에 나머지 1개를 닫았다. 시험구간이 6(4)에서 6(5)로 변경될 경우에는 수소압력 변경과 산화제펌프 출구 오리피스 변경이 동시에 이루어지는데, 산화제펌프에 미치는 충격을 완화시키기 위하여 Time=100sec에 먼저 오리피스를 변경하고 5초 후인 Time=105sec에 수소 압력을 증가시켰다.

Test No. 6에서 시간에 따른 주요 측정량을 Fig. 4~6에 제시하였다. 시험시간은 총 120초이다. 터보펌프 회전수 및 터빈 입구 압력의 변화를 Fig. 4에 제시하였는데 운용점 변화에 따라 값이 변화되는 것이 관찰된다. 터보펌프 회전수에는 터빈 입구 압력이 지배적인 영향을 미쳤다. 산화제펌프의 유량비 변화를 작게 하였으므로 출구 오리피스 개도가 회전수에 미치는 영향은 작았다.

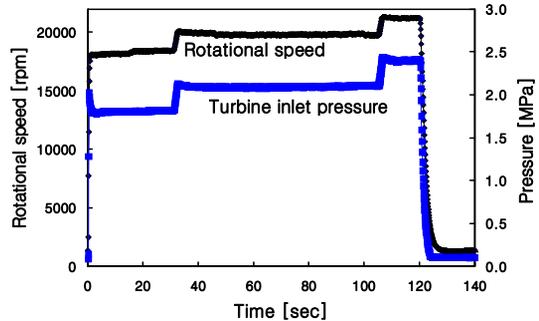


Fig. 4. Rotational speed of turbopump and inlet pressure of turbine

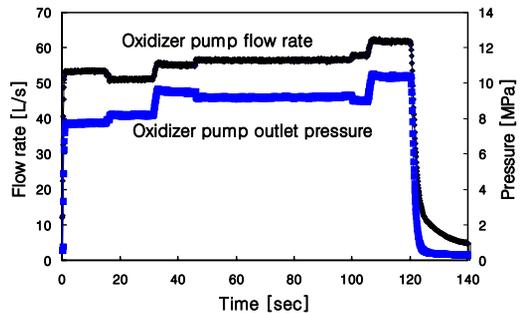


Fig. 5. Flow rate and outlet pressure of oxidizer pump

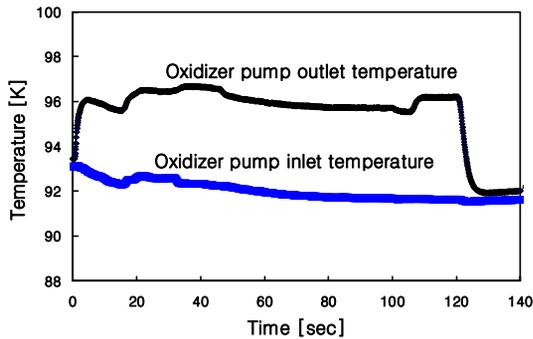


Fig. 6. Temperature at inlet and outlet of oxidizer pump

산화제펌프 유량, 산화제펌프 출구 압력을 Fig. 5에 제시하였는데 운용점 변경에 따라서 그 값이 변화되는 것이 관찰된다. 6(1)~6(5)의 5개 시험구간에서 유량과 압력이 5단계로 변화한다. Table 3의 산화제펌프 유량비는 오리피스 개도(혹은, 개방 오리피스 개수)에 직접적인 영향을 받는다. 여기서 유량비는 설계 유량계수에 대한 시험구간에서의 유량계수를 의미한다.

산화제펌프 입구 및 출구 배관에서 측정된 유체 온도를 Fig. 6에 제시하였는데 정격조건인 시험구간 6(4)에서 출구 온도가 입구온도에 비하여 약 4K 높았다. 산화제펌프의 베어링 온도의 경우 전방 베어링 온도는 펌프입구온도와 동일하였으며 후방 베어링 온도는 펌프 입구온도에 비하여 약 5K 높았다. 이로부터 산화제펌프 베어링은 냉각이 양호하게 진행되고 있는 것으로 판단된다.

3.2 단품 성능시험과 조립체 시험의 비교

국내에서 수행된 산화제펌프 단품 성능시험 결과와 본 시험의 Test No. 6의 터보펌프 조립체 시험결과를 비교하여 펌프의 양정계수-유량계수 형태로 Fig. 7에 제시하였다. 양정계수와 유량계수는 펌프 양정과 유량의 무차원 값으로서 각각 $H/(u_{2t}^2/2g)$, $Q/A_1 u_{1t}$ 이며 여기서 H 는 펌프 양정, 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 성능시험은 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하였으며 시험 회전수는 10,000 rpm 내외로 하였다. Fig. 7에서 단품 성능시험 결과는 실선으로 표시하였고 터보펌프 조립체 시험 결과는 기호로 표시되어 5개의 운용점으로 나타난다. Fig. 7을 보면 동일한 유량계수에서 조립체 시험의 양정계수가 단품시험의 양정계수에 비하여 약 2~3% 더 낮았다.

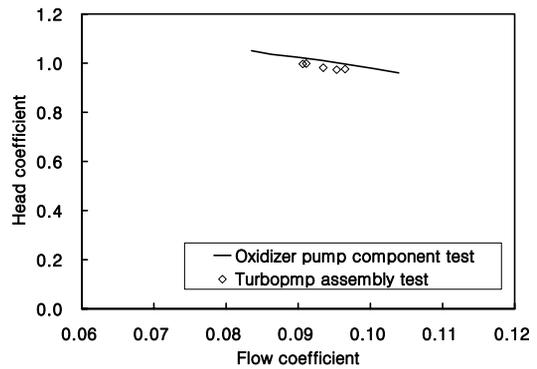


Fig. 7. Comparison of head vs. flow of oxidizer pump

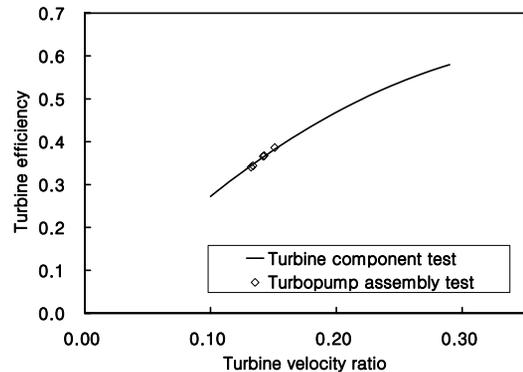


Fig. 8. Comparison of efficiency vs. velocity ratio of turbine

운전 중 실과 임펠러 사이의 간극이 서로 동일하더라도 극저온 매질에서 운전되는 경우는 물에서 운전되는 경우에 비하여 동일한 유량에서 펌프 양정이 약간 감소한다고 알려져 있으며 이는 두 매질의 점성계수 차이로 인한 체적효율의 차이 때문에 발생한다. 본 산화제펌프 경우 임펠러와 케이싱간의 실(seal)로서 플로팅링(floating ring)실이 사용된다. 액체산소에서 운전할 때는 상온 조립상태에 비하여 플로팅링과 임펠러 간극이 감소하며, 물에서 시험할 경우에는 이 감소량을 감안하여 실을 제작함으로써 물에서 운전될 때에도 액체산소에서 운전될 경우와 유사한 실 간극이 되도록 하였다.

본 산화제펌프의 경우 임펠러의 전방 및 후방 플로팅링을 통하여 펌프 매질이 임펠러 출구로부터 임펠러 입구로 되돌아가는 흐름이 존재한다. 액체산소의 동점성 계수는 물의 1/6 수준이므로 펌프가 액체산소에서 운전될 경우는 물에서 운전

되는 경우에 비하여 펌프 내부에서 순환되는 유체의 양이 많아지게 되어, 동일 유량(펌프 입구 배관에서 측정되는 유량 기준)에서 실제 펌프 임펠러를 통과하는 유량이 더 많게 되며 이에 따라 양정이 더 낮아지게 되는 것이다. 단품 성능시험의 양정계수-유량계수 관계의 기울기를 고려할 때 본 산화제펌프의 체적효율은 액체산소에서 운전되는 경우가 물에서 운전되는 경우에 비하여 약 6~7% 더 낮을 것으로 예측된다.

국내에서 수행된 터빈 단품 시험 결과와 본 시험의 조립체 시험 결과를 터빈의 효율-속도비 형태로 Fig. 8에 제시하였다. 본 터빈의 설계 속도비는 약 0.25인데 상온 수소가스로 터빈을 구동하는 본 조립체 시험의 경우는 이보다 낮은 속도비인 0.13~0.15에서 운전되었다. 터빈 단품 시험은 상온의 공기를 매질로 하고 수력동력계로 터빈에서 생성되는 동력을 측정하는데 시험 회전수를 약 12,000 rpm 이하로 하였다. 터빈 단품 시험을 통하여 터빈 효율을 터빈의 속도비와 압력비의 함수로 얻을 수 있다. 이 터빈 효율을 Fig. 8에서 실선으로 표시하였으며 이 때 터빈 압력비는 본 조립체 시험에서 Test No. 6의 평균값을(6(1)~(5)의 5개 구간에서 압력비 범위는 11.2~12.6이며 그 평균값으로 11.9) 사용하였다. 한편 본 시험의 조립체 시험에서 펌프에 소요되는 동력을 본 시험의 터빈 단품 동력으로 나누어 얻은 값이 Fig. 8에 기호 다섯 개로 표시된 조립체 시험의 터빈 효율이다. 시험 결과를 비교하면 터빈의 조립체 시험 효율과 단품 시험 효율의 차이는 1% 이내이다. 즉 두 시험 결과가 매우 양호하게 일치하고 있으며 이로부터 산화제펌프-터빈의 조립체 성능시험뿐만 아니라 펌프 단품 성능시험, 터빈 단품 성능시험이 성능측정 관점에서 신뢰성 있게 수행된 것을 간접적으로 알 수 있다.

IV. 결 론

개발 중인 터보펌프의 산화제펌프에 대하여 실매질인 액체산소를 사용하여 성능시험이 이루어졌으며 그 주요 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 산화제펌프는 액체산소를 매질로 하여 설계 및 탈설계 운용점에서 안정적으로 작동하였다.

둘째, 액체산소에서 측정된 산화제펌프 양정계수는 물에서 측정된 경우에 비하여 2~3% 더 작았으며 그 이유는 액체산소의 경우 동점성계수가

작아서 펌프의 체적효율이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

셋째, 산화제펌프-터빈의 조립체 형태에서 측정된 터빈 효율과 터빈 단품 성능시험에서 측정된 터빈 효율의 차이는 1% 내외로서 두 효율 값이 잘 일치하였다. 이로부터 터빈 및 펌프 단품 성능시험과 산화제펌프-터빈 조립체 시험이 성능 시험 측면에서 신뢰성 있게 수행된 것을 간접적으로 알 수 있다.

참고문헌

- 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", AIAA 2007-5516, 2007.
- 3) 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황", 한국추진공학회지, 제12권 제5호, 2008, pp. 73-78.
- 4) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, "로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험", 제4회 한국유체공학 학술대회 논문집, 2006, pp. 523-526.
- 5) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, "로켓엔진용 연료펌프의 추추력 측정", 제25회 한국추진공학회 추계학술대회, 2005, pp. 358-362.
- 6) 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한, "터보펌프 조립체의 수력 성능 시험", 대한기계학회논문집 B권, 제32권 제4호, 2008, pp. 249-254.
- 7) 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한, "액체로켓용 터보펌프의 고온 성능시험", 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007, pp. 56-60.
- 8) 홍순삼, 김진선, 김대진, 김진한, "터보펌프 조립체의 고온 성능시험", 유체기계 연구개발 발표회, 2008, pp. 349-350.
- 9) 정은환, 김진한, "충동형 터빈에 대한 시험적 고찰", 유체기계저널, 제8권 제6호, 2005, pp. 26-32.
- 10) 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 실매질시험", 제31회 한국추진공학회 추계학술대회, 2008, pp. 359-365.
- 11) 김승환, 남창호, 김철웅, 문윤환, 설우석, "터보펌프+가스발생기 폐회로 연계시험", 제31회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집, 2008, pp. 129-132.

12) Takida, J., Yoshikawa, K., Ogawara, A., Atsumi, M., Miyagawa, K., Kobayashi, K., Miyawaki, T., "Development of High Performance Oxidizer Turbo-pump", AIAA 2007-5509, 2007.

13) Kinefuchi, K., Uchiumi, M., Inoue, M., Hirata, K., "LE-7A FTP Full Load Cold Run", Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Kitakyushu, Japan, AJCPP2005-22033, 2005.