

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.5.079>

터보펌프 실매질 시험설비를 위한 알코올버너 개발시험

김진선^a · 한영민^b · 고영성^{c,*}

Development Test of Alcohol Burner for Turbopump Real-propellant Test Facility

Jin-Sun Kim^a · Yeoung-Min Han^b · Youngsung Ko^{c,*}

^aTurbopump Department, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^bDepartment of Propulsion Test and Evaluation, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^cSchool of Aerospace Engineering, Chung-Nam National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

ABSTRACT

A turbopump real-propellant test facility(TPTF) is to verify the performance of a turbopump unit(TPU) based on liquid oxygen and kerosene. One of the most important sub-facilities is a hot-gas generation system which makes the driving force of the TPU with an alcohol burner. The alcohol burner generates the required flow rates and temperature at the facility using high pressure air and ethanol. In the study, the verification tests of the alcohol burner which was manufactured entirely with domestic technology were performed and fabrication technique and operation skill for the burner could be obtained ahead of the construction of the facility. Two burners will be operated simultaneously for the real-propellant test of 75tf class turbopump and satisfy the power requirement from the turbine of the TPU.

초 록

터보펌프 실매질 시험설비는 액체산소와 케로신을 토대로 터보펌프 조립체의 성능을 검증하는 시험 설비이다. 이 시험설비 중에서 가장 핵심적인 부분은 터보펌프의 구동력을 생성시키는 고온공기 생성 시스템이다. 고압공기와 에탄올을 사용하는 알코올버너에 의해 시험시설에서 요구되는 유량과 온도가 생성된다. 본 연구에서는 국내기술로 제작한 알코올버너의 개발시험을 수행하였으며, 터보펌프 실매질 시험설비 구축에 앞서 버너의 제작기술과 운용경험을 확보할 수 있었다. 75톤급 터보펌프 실매질 시험 에서는 이 알코올버너가 2기 동시 운용되어 터빈이 요구하는 구동력을 충족시킬 것으로 보인다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Real-propellant Test Facility(실매질 시험설비), Alcohol Burner (알코올버너), High Pressure Air(고압공기), Ethanol(에탄올)

Received 3 December 2012 / Revised 21 August 2014 / Accepted 28 August 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23,

여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

한국형발사체(KSLV-II)는 액체연료를 사용하는

다단로켓으로 총 3단으로 구성되며, 각 단에 적용되는 엔진은 터보펌프(turbopump)에 의해 추진제 공급이 이루어지는 액체로켓엔진으로 구성된다. 이 터보펌프는 고유량의 액체산소와 케로신을 고압으로 승압시켜 연소기에 공급하는 액체로켓엔진에서 핵심적인 구성요소로서, 한국형 발사체를 위해서는 75톤급 엔진과 7톤급 엔진용 터보펌프 2종이 현재 개발진행 중에 있다.

터보펌프는 액체로켓엔진에서 극저온, 고온, 고압 환경 하에서 고회전수로 작동한다. 이러한 작동환경을 극복하기 위해서 다양한 개발시험을 통하여 그 완성도를 높여 나가게 되는데[1,2], 개발 초기에는 터보펌프의 주요 구성품인 산화제 펌프(LOX pump), 연료펌프(fuel pump), 터빈(turbine)의 단품시험(component test)이 주를 이루게 된다[3,4]. 단품시험에서는 주로 저회전수에서 성능특성과 유량 및 회전수에 대한 상사성 등을 분석하게 되며, 기타 제작성 및 조립성 등을 검증하게 된다. 이러한 단품시험을 통하여 얻어지는 결과를 토대로 유사매질(상온 물, 액체질소 등)을 통한 터보펌프 조립체(turbopump unit, TPU)의 성능시험이 수행되고, 궁극적으로는 실패질(액체산소, 케로신) 시험을 통하여 최종적인 성능을 입증하게 된다[5-7].

이러한 개발시험과정에서 펌프 단품의 경우는 모터를 기반으로 하여 동력공급이 이루어지지만, 조립체 시험의 경우는 구동력을 생성시킬 수 있는 별도의 시스템을 필요로 하게 된다. 간단한 시스템으로는 압축공기 등을 이용한 상온가스의 구동방식이 있으나, 터보펌프의 요구동력을 충족시키기 위해서는 터빈에 공급되는 가스유량을 증가시켜야 하는데, 터빈에 공급되는 이 가스유량의 증가는 터빈 노즐 블럭의 압력을 상승시키는 문제를 동반하기 때문에 구조적 제약을 받게 된다. 터빈에 공급되는 가스의 온도를 높이면 터보펌프 구동을 위한 유량을 줄일 수 있으며, 이는 터빈 노즐 블럭의 운용압력을 낮출 수 있는 효과를 발생시킨다. 현재 구축 중인 터보펌프 실패질 시험설비(TPTF)에서는 이 온도조건을 충족시키기 위해 고압의 압축공기와 에탄올을 사용하는 알코올버너가 적용된다[8].

본 연구는 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 실패질 시험설비에서 터빈의 구동력 생성을 위해 적용된 알코올버너에 대한 제작과 시제품 검증을 위한 개발시험을 수행한 결과이다.

2. 시제품 및 시험설비

2.1 알코올버너 시제품

터보펌프 실패질 시험설비에 적용되는 알코올버너는 액체로켓엔진의 구성품인 가스발생기(gas generator)의 터빈 구동력 생성기능을 지상시험에서 대체하는 것으로서 보다 안정적 운용이 가능하고 반영구적으로 사용할 수 있는 시험설비의 핵심적인 구성품이다.

그 동안 해외기술에 의존해 사용해 온 공기가열기(air heater)는 운용 중 실화에 의한 연소불안정과 핵심 구성품의 제작성 및 내구성에 취약점을 보유하고 있었다. 본 개발시험에 적용된 알코올버너는 공기가열기의 결함을 보완하고, 구조적인 내구성을 보장하여 국내제작기술로 재구현한 개발시제품이다. 그 기본 규격은 Table 1에 제시한 것과 같이 산화제(상온 공기)와 연료(에탄올)를 혼합하여 최대 6.0 kg/s의 구동가스를 627°C로 터빈에 공급할 수 있다. Fig. 1에서는 알코올버너의 내부 단면도와 제작된 시제품(Technology Demonstration Model, TDM)의 형상을 보여주고 있으며, Fig. 2에서는 버너의 주요부품으로 보염을 위한 스테빌라이저(stabilizer), 초기점화를 위한 시동인젝터(starting injector), 연료의 무화를 촉진시키기 위한 리플렉터(reflector), 희석노즐을 포함한 라이너(liner)의 형상을 차례로 보여주고 있다.

Table 1. Specifications of alcohol burner.

Fluid	Flow rate (kg/s)	Pressure (MPa)	Temperature (°C)
Air	5.8	13.0	Normal
Ethanol	0.2	9.0	Normal
Burned gas	6.0	8.0	627

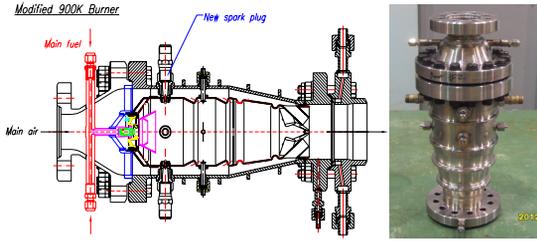


Fig. 1 Technology demonstration model(TDM) of alcohol burner.

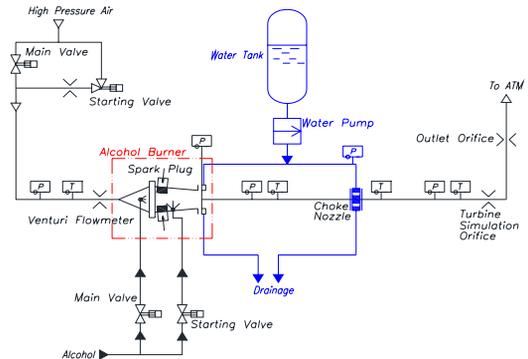


Fig. 3 Schematic of the alcohol burner system.

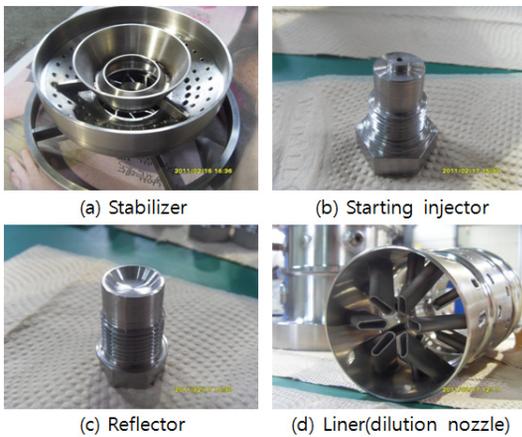


Fig. 2 Main parts of alcohol burner.

Table 2. Specifications of the test facility.

System	Specifications	
	Parameter	Value
Alcohol burner	Flow rate	6.0 kg/s
	Temperature	< 750°C
Turbine simulation orifice	Diameter	Ø35.4 mm
	Pressure	5~6 MPa
	Pressure ratio	18
	Temperature	627°C
Oxidizer	Fluid	Air
	Capacity	40 m ³ (32 MPa)
	Dew point	< -40°C
Fuel	Fluid	Ethanol(99.9%)
	Capacity	90 L (27 MPa)

2.2 시험설비

Table 1에서 제시된 알코올버너의 용량은 75 톤급 엔진용 터보펌프 터빈이 요구하는 유량의 약 1/2로써, 터보펌프 실회전수의 79%정도만 생

성시킬 수 있다. 이를 실회전수로 구동시키기 위해서는 제시된 규격의 알코올버너 2기를 병렬로 설치하여, 동시 점화한 다음 생성가스를 혼합하여 터빈에 공급하여야 한다[8]. 하지만 본 연구에서는 버너자체의 성능검증이 목적이므로 개별 점화시험을 통한 시제품의 검증이 이루어졌다.

국내 자체기술로 제작된 알코올버너를 검증하기 위한 시험설비의 규격과 개략도를 Table 2와 Fig. 3에 제시하였다. 버너의 개발시험을 위해서 터빈모사 오리피스 목직경의 크기는 터빈의 입구압력을 구현하기 위해서 75톤급 터보펌프에 적용된 터빈노즐의 대표 목면적(개별노즐 목면적의 합)과 실제 터빈노즐 및 모사 오리피스의 유출계수(C_d) 값을 고려하여 산정되었으며, 터빈입구에서 요구되는 온도는 설계요구조건과 동일한 값으로 하였다. Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 버너 상류에 배치된 산화제와 연료의 공급밸브는 초기점화를 위한 시동밸브와 주공급용 메인 밸브로 구성되며, 버너하류에서는 냉각플랜지와 초크노즐을 냉각시키기 위한 냉각수 공급이 지원된다.

Fig. 4에서 검증시험을 위해 장착된 알코올버너와 터빈모사 오리피스의 설치형상을 보여주고 있다. 알코올버너는 시험 중에 발생하는 진동과 고온라인의 열팽창으로 인한 시제품 손상을 방지하기 위해 지지프레임에 고정되어 있다. 이 알코올버너부터 터빈모사 오리피스 사이의 배관은 고온 환경에 의한 라인의 열팽창을 고려하여 고정부를 제거한 상태이다. 터빈모사 오리피스 하

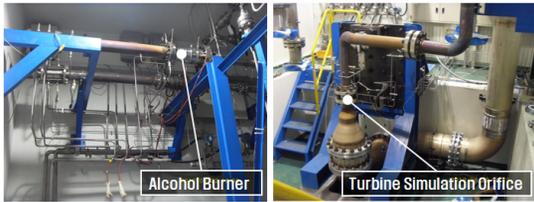


Fig. 4 Installed alcohol burner and turbine simulation orifice.

Table 3. Setting pressure and temperature limits for the performance test.

Mode	PAR		Operating Time (sec)	T_limit (°C)
	Fuel (MPa)	Air (MPa)		
1	5.0	7.9	8.0	250~950
2	6.2	9.4	3.0	500~850
3	8.0	11.4	3.0	
4	9.0	13.4	3.0	
5	9.0	13.4	10.0	500~750

Table 4. Operating time of valves and devices.

Valve & device	Time (sec)	
Spark plug	on	0.000
Starting alcohol	on	1.222
Starting air	on	2.030
Main alcohol	on	2.532
Main air	on	3.522
Spark plug	off	6.524
Starting alcohol	off	7.024
Mode 2	on	8.016
Main alcohol	off	8.796
Main air	off	8.964
Starting air	off	18.764

류는 확대된 라인으로 구성시켜 팽창된 고온가스를 대기로 방출시키게 된다.

3. 시험 결과

알코올버너의 성능을 검증하기 위해 동일한 형상으로 제작된 2기의 시제품이 검증시험에 사용되었다. 총 6차에 걸쳐 성능시험이 이루어졌으

며, 첫 번째 시제품에서 수행된 1~3차 시험결과는 실화에 의한 연소불안정에 대한 현상을 보여주는 내용이며, 두 번째 시제품에 대한 4~6차 시험에서는 수정 보완된 버너의 각 모드별 안정적 거동과 재현성을 검증한 내용이다. 본 논문에 제시된 결과는 각 시제품에 대한 대표적인 시험결과를 토대로 설명된다.

3.1 연소불안정에 의한 알코올버너의 비정상 거동

첫 번째 알코올버너 시제품에 대한 대표적인 시험결과로서 점화초기 혹은 천이과정에서 반복되는 화염날림(blowout)에 의한 연소불안정에 대한 시험결과이다. 알코올버너가 정상상태에 도달하기 위해서는 Table 3에서 보여주는 것과 같이 총 5단계의 모드를 거쳐야 한다. 각 모드는 사전에 주요 파라미터들이 설정되고, 시스템의 시작과 함께 설정된 값들에 따라 순차적으로 모드의 진행이 이루어진다. mode 1은 초기 점화가 이루어지는 시동 모드 구간이며, mode 2~4까지는 천이 모드로서 정상상태인 mode 5에 도달하기 까지 버너가 온도/압력의 급격한 변화에 대한 노출을 최소화 하기위해 적절한 압력상승에 대한 배분이 이루어는 구간이다. Table 3은 1차 시제품 개발시험에 대한 각 모드의 주요설정압력과 단계별 제한온도 및 각 모드에 주어진 허용시간을 보여주고 있다. 버너에 공급되는 연료와 공기의 공급유량은 압력제어만으로 이루어지기 때문에 점화 시, 버너내부에서 형성된 연소압력과 설정압력의 차압에 따라 연료의 분사량이 결정되고, 이 분사량에 따라 버너의 연소온도가 달라진다. 최종모드(mode 5)에서 Table 1에 제시된 버너의 정격유량(6 kg/s)과 정격온도(627°C)가 형성되며, 운용과정에서 각 모드별 온도제한조건은 버너하류(Fig. 3)에서 측정된 온도가 설정된 범위를 벗어나면 시스템의 모든 진행과정을 중단시키고 자동으로 버너운용이 종료된다. 초기모드(mode 1)에서는 점화를 위해 넓은 영역으로 온도를 제한하고, 이 후 장시간 운용되는 작동영역(mode 5)으로 올라 갈수록 정확한 작동점 유지와 시험설비의 보호를 위해 목표온도에 근접하도록 제한한다.

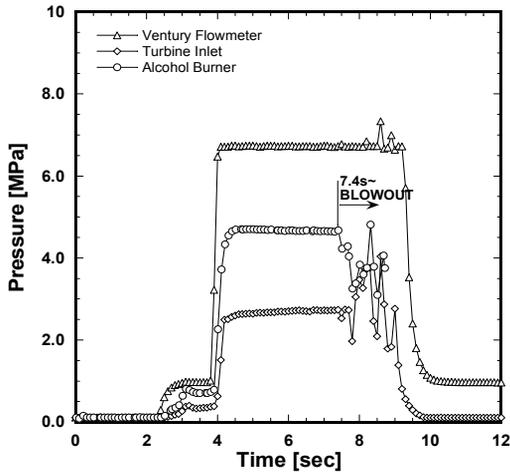


Fig. 5 Pressure vs. time curve for the 1st TDM.

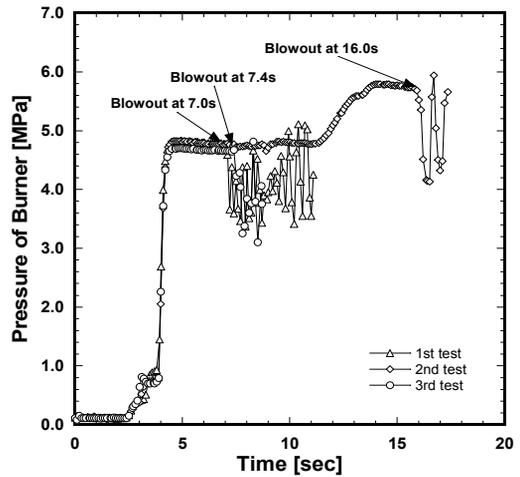


Fig. 8 Pressure fluctuation of burner chamber by the abnormal operation.

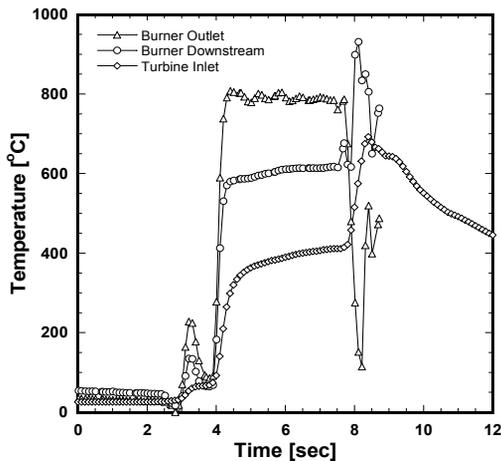


Fig. 6 Temperature vs. time curve for the 1st TDM.

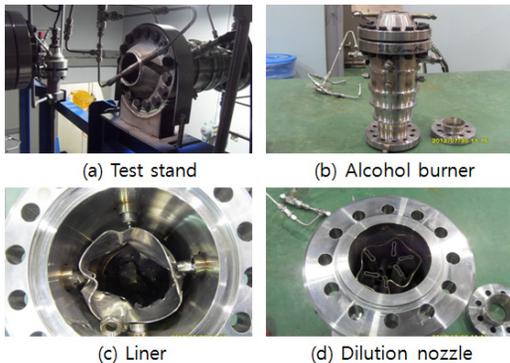


Fig. 7 Burner inspection after the performance test.

Table 4에서는 실제 시험과정에서 작동하는 밸브류 및 모드천이 등의 동작시간에 대한 기록을 보여준다. 가장 먼저 점화플러그가 작동되었고, 이어서 시동알코올(starting alcohol)과 시동 공기(starting air)가 순차적으로 공급되었다. Table 3에 제시한 mode 1 구간 내에서 버너의 초기점화를 위한 시스템의 주요제어가 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. 이 구간은 시동초기 점화와 착화가 이루어지는 시기로 모드천이 전에 연소실 내의 화염을 가능한 안정화시켜 주어야 하는 구간이다. 하지만 Fig. 5와 Fig. 6에 제시된 시험결과에서 보면 7.4초경에 실화가 발생하면서 버너내부에서 재점화가 주기적으로 반복되는 현상을 볼 수 있다. 이로 인하여 연소실 내부는 최대 2 MPa 정도의 압력섭동과 극심한 온도변화를 경험하게 되었고, 이로 인해 Table 4에서 보여주는 것과 같이 8.7초경에 비상정지(알코올과 공기 공급밸브 차단)를 수행하게 되었다.

버너내부에서 큰 압력섭동이 주기적으로 반복되는 현상이 누적되어 3차 시험 중에는 Fig. 7에서 보여주는 것처럼 시제품의 파손까지 초래하게 되었다. Fig. 8에서 첫 번째 시제품으로 총 3차의 시험과정 동안 실화와 재점화에 의한 비정상적 버너내부의 압력변화를 보여주고 있는데, 특히 mode 1 종료시점 혹은 모드천이구간에서

주로 실화가 발생하는 것을 볼 수 있다. 초기점화 시에 버너내부는 상온상태이며, 버너유량의 95% 이상을 차지하는 상온 고압공기 또한 상류의 감압밸브와 노즐을 통과하면서 팽창에 의하여 온도가 급격히 떨어져 버너로 유입된다. 이렇게 형성된 저온환경에서 상대적으로 저유량의 연료분사에 의해 형성된 버너내부의 초기화염은 주변으로 다량의 열손실 발생으로 인하여 모드의 천이가 시작되기 전에 화염의 안정적인 안착이 불가능했을 것으로 판단된다.

3.2 구조변경과 수정알고리즘을 적용한 알코올버너의 성능시험

1차 시제품에서 확인된 문제점을 보완하기 위해서 2차 시제품에서는 보다 안정적인 화염안착을 위해 Fig. 9와 같이 스테빌라이저에 재순환영역(recirculation zone)을 추가적으로 형성시킬 수 있는 구조변경을 수행하였다. 이러한 구조물을 삽입하게 되면 재순환영역이 추가적으로 형성되어 화염이 삽입된 구조물 주위에 안착되는 변화를 가져오게 된다. 이러한 변화는 스테빌라이저 하류에 형성되던 화염을 스테빌라이저 근처로 끌어올려 화염을 보다 안정화 시키는 효과를 발생시키게 되는데, Fig. 9의 형상에서도 볼 수 있듯이 시험 후 삽입물 주변으로 화염부착으로 인한 그을음(soot)이 집중적으로 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 추가적인 조치로 1차 시제품의 시험과정에서 보였던 버너 파손현상을 방지하기 위해 용접부를 보강하여 2차 시제품에서는 버너의 구조강도를 더욱 향상시켰다.

알코올버너 시스템의 운용 알고리즘에 있어서도 초기 점화구간(mode 1)에서 발생하는 열손실을 극복하기 위해서 점화플러그의 작동시간을 7초에서 11초로 연장시켰고, 시동알코올의 분사시간을 13초까지 지속시켰다. 또한, 시동알코올 차단 후, 바로 mode 2로 진입하는 방식에서 mode 1 구간을 5초 동안 더 유지한 다음, mode 2로 천이가 시작되도록 하여 버너내부의 예열과 함께 화염이 안정적으로 안착될 수 있도록 운용알고리즘을 수정 반영하였다. Table 5에서는 수정 알고리즘이 반영된 시험과정에서의 밸브거동과

각 모드의 천이시간에 대한 기록을 Table 4의 결과와 비교하며 보여주고 있다.

2차 시제품은 총 5차례 시험이 수행되어졌다. 각 모드(mode 1~4)를 순차적으로 검증하는 개별 시험을 4회 수행하였으며, 최종모드(mode 5)에서는 정상상태로 30초 운용시간을 안정적으로 지속시키는 장시간 운용시험(long duration test)이 이루어졌다. 그 중 장시간 운용시험의 결과를 Fig. 10, 11에 나타내었는데, Fig. 10에서는 버너상류 벤투리 유량계, 버너내부 및 터빈모사 오리피스 입구압력을, Fig. 11에서는 알코올버너의 연소온도 및 터빈모사 오리피스 입구온도의 변화를 나타내고 있다. 18초까지 mode 1의 상태로 지속되다가 이 후 모드의 천이가 시작되고, 최종 모드에서 버너내부의 압력이 8.0 MPa 가까이 형성되어 30초 동안 안정적으로 지속되는 것을 볼 수 있다. 온도변화에서는 버너와 터빈모사 오리피스 사이의 배관길이(약 8 m)로 인한 열손실로 초기 점화구간(mode 1)에서는 터빈모사 오리피스 입구온도가 버너에서 형성되는 온도보다 상대적으로 낮게 형성되지만, 최종모드에 도달하면서 버너의 연소온도와 거의 유사하게 형성되고 있음을 볼 수 있다. 실제 터보펌프를 장착한 시험과정에서는 30초 이상의 장시간 운용시험이 수행되므로 터빈입구온도는 버너에서 형성되는 온도와 거의 유사하게 나타날 것으로 예상된다.

Fig. 12에서는 버너에 공급된 공기와 알코올의 유량변화를 보여주고 있다. 시스템 종료 전 5초간($\Delta t=48\sim 53$ sec) 평균유량으로 볼 때, 공기유량 5.90 kg/s, 알코올유량 0.18 kg/s로 버너에 의해 생성된 총유량은 6.08 kg/s로 나타났다. Table 6의 시험결과를 토대로 한 터빈의 가용동력(P_{av})은 Eq. 1에 의하여 3.08 MW로 나타난다. 실제 터보펌프 실매질 시험설비에서 터빈입구온도(TIT)를 627°C까지 상승시키고 2기의 버너를 동시 운용할 경우 약 6.40 MW의 가용동력을 확보할 수 있다. 현재 개발 중인 75톤급 터보펌프 터빈의 보수적인 효율(약 52%)을 적용하더라도 3.3 MW 이상의 동력을 펌프에 전달시킬 수 있어 터보펌프 조립체의 설계점에서 소요동력(3.28 MW)을 충족시킬 수 있게 된다.



(a) Early model (b) Modified model

Fig. 9 Modified stabilizer with a recirculation zone.

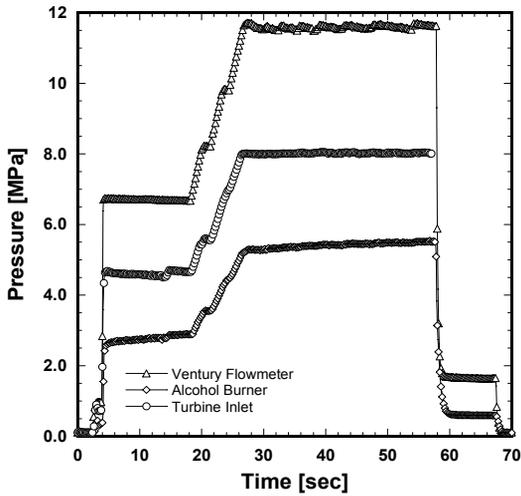


Fig. 10 Pressure vs. time curve for the 2nd TDM.

Table 5. Operating time of valves and devices.

Valve & device	Operating time (sec)		
		Modified algorism	Table 4
Spark plug	on	0.002	0.000
Starting alcohol	on	1.229	1.222
Starting air	on	2.030	2.030
Main alcohol	on	2.518	2.532
Main air	on	3.522	3.522
Spark plug	off	11.030	6.524
Starting alcohol	off	13.030	7.024
Mode 2	on	18.003	8.016
Mode 3	on	21.015	-
Mode 4	on	24.139	-
Mode 5	on	27.000	-
Main alcohol	off	57.206	-
Main air	off	57.386	-
Starting air	off	67.174	-

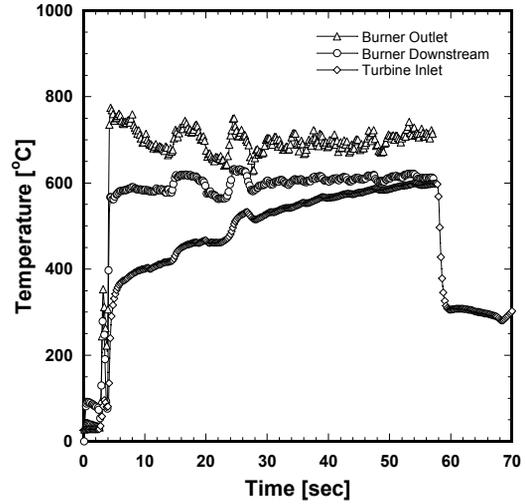


Fig. 11 Temperature vs. time curve for the 2nd TDM.

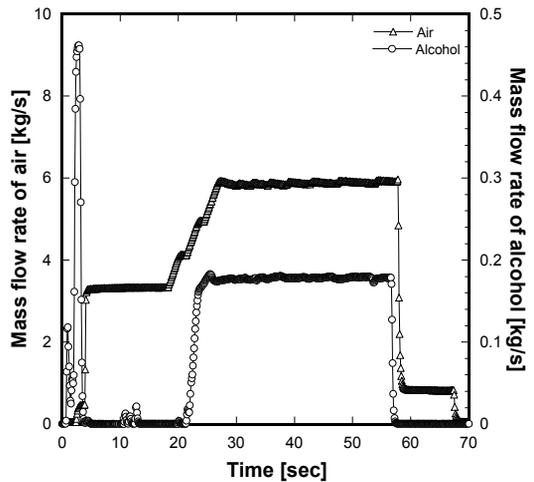


Fig. 12 Mass flow rates of air and alcohol.

Table 6. Test results for turbine inlet ($\Delta t=48\sim 53$ sec).

Notation	Meaning	Test results
P_{in}	Inlet pressure	5.48 MPa
T_{in}	Inlet temperature	588°C
\dot{m}	Mass flow rate	6.08 kg/s
PR	Pressure ratio	18
P_{av}	Available power	3.08 MW

$$P_{av} = \dot{m} C_p T_{in,stag} (1 - PR^{(1-k)/k}) \quad (1)$$

4. 결 론

터보펌프 실매질 시험설비에서 터보펌프의 구동력을 생성시킬 수 있는 알코올버너의 개발시험을 수행하였다. 그 동안 해외기술에 의존해 오던 알코올버너를 국내에서 자력으로 설계/제작하여 검증시험을 수행함으로써, 그 성능과 제작기술을 확보할 수 있었다. 총 6차에 걸친 성능검증시험을 수행하여 최대 30초 동안 약 6 kg/s의 정격유량을 생성시키면서 터빈입구의 요구온도(약 627°C)를 만족시켰다. 또한, 내부구조를 보완하고 보강함으로써 보다 안정적인 알코올버너의 운용을 확보하였고, 단계별 시험을 통하여 초기 실화와 같은 기존 운용알고리즘의 문제점을 보완할 수 있었다. 이 알코올버너는 터보펌프 실매질 시험설비에서 지상검증시험에 적용될 예정이며, 2기 동시운용을 통하여 75톤급 엔진용 터보펌프가 요구하는 구동력을 생성해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Kim, J., "Status of the Development of Turbopumps in Korea," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 73-78, 2008.
2. Kim, J., Hong, S.S., Jeong, E.H., Choi, C.H. and Jeon, S.M., "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine," *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Cincinnati, OH, U.S.A., AIAA 2007-5516, Jul. 2007.
3. Kim, J.S., Hong, S.S., Kim, D.J., Choi, C.H. and Kim, J., "Cryogenic Performance Test of LOX Turbopump in Liquid Nitrogen," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 391-397, 2010.
4. Jeong, E.H., Park, P.G., Lee, H.G. and Kim, J., "Development of the Velocity Compounded Impulse Turbine for the 75ton Liquid Rocket Engine Application," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 40-46, 2011.
5. Hong, S.S., Kim, J.S., Kim, D.J. and Kim, J., "Performance Test of Turbopump Assembly for 75 Ton Liquid Rocket Engine Using Model Fluid," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 56-61, 2011.
6. Hong, S.S., Kim, D.J., Kim, J.S. and Kim, J., "Real-Propellant Test of a Turbopump for a 30-Ton Thrust Level of Liquid Rocket Engine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 20-26, 2009.
7. Kamijo, K., Sogame, E. and Okayasu, A., "Development of Liquid Oxygen and Hydrogen Turbopumps for the LE-5 Rocket Engine," *AIAA Journal*, Vol. 19, No. 3 pp. 226-231, 1982.
8. Kim, J.S. and Ko, Y., "Introduction to Construction of a Turbopump Real-Propellant Test Facility," *Proceedings of the 2011 KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 835-840, Nov. 2011.